



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

ANTTI MÄNNISTÖ  
STOFIX -KIINNITYSJÄRJESTELMÄN KEHITTÄMINEN KOVALLE  
ERISTEELLE  
Diplomityö

Tarkastaja: professori Matti Pentti  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden ja rakentamisen tiedekun-  
taneuvoston kokouksessa 4. touko-  
kuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**ANTTI MÄNNISTÖ:** Stofix -kiinnitysjärjestelmän kehittäminen kovalle eristeelle  
Diplomityö, 67 sivua, 10 liitesivua  
Toukokuu 2016  
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Rakennustuotanto  
Tarkastaja: professori Matti Pentti

**Avainsanat:** Stofix, julkisivu, tiili, kiinnitysjärjestelmä, polyuretaani

Tukholman alueella asuntojen hinnat ovat erittäin korkeita. Yksi asuinneliö Tukholman keskustassa maksaa keskimäärin 88 000 kruunua (9 360 €). Energiavaatimusten tiukentuessa seinäpaksuudet kasvavat tavanomaisilla ratkaisuilla ja paksummat seinärakenteet vievät osan kallisarvoisista asuinneliöistä. Uusilla seinäratkaisuilla on mahdollista rakentaa ohuempia energiavaatimukset täyttäviä seinärakenteita. Tehokkaammilla lämmöneristeillä päästään ohuempiin seinäratkaisuihin. Polyuretaanieristeet ovat mineraalivilloja tehokkaampia lämmöneristeitä. 150 mm polyuretaanieristettä vastaa 250 mm mineraalivillaa lämmönvastukseltaan. Stofix -julkisivujärjestelmässä on suunniteltu käytettävän mineraalivillaaeristettä, mutta siinä voidaan käyttää myös kovia polyuretaanieristeitä. Siinä on kuitenkin omat haasteensa. Tämän diplomityön tavoitteena oli suunnitella Stofix -järjestelmään uusi seinäkiinnike, jota voidaan käyttää kovan polyuretaanieristeen kanssa ja poistaa asennusongelmia, joita esiintyy polyuretaanieristeen asentamisessa nykyiseen järjestelmään. Tavoitteena oli myös tutkia polyuretaanilevyillä eristetyn betoni-seinän rakennusfysikaalista toimivuutta.

Kiinnikkeen suunnittelu lähti liikkeelle kiinnikettä rasittavien kuormitusten selvittämisestä. Kuormituksia laskettiin eurokoodien mukaan Suomen ilmastossa. Seinärakenteiden toimivuutta polyuretaanieristeen kanssa ja sen käytössä huomioon otettavia asioita tutkittiin palo-, lämpö- ja kosteusteknisestä näkökulmasta. Myös polyuretaanisen seinän akustiikkaa tutkittiin. Kiinnikkeestä mietittiin neljä vaihtoehtoa, joista yksi valittiin lähempään tarkasteluun. Valitun kiinnikkeen toimintaa ja käyttäytymistä tutkittiin yksinkertaisen statiikkamallin ja FEM -pohjaisen ANSYS -laskentatyökalun avulla. Kiinnikkeestä mallinnettiin 3D -malli ANSYS ohjelmaan, jota rasiutettiin mitoituskuormien mukaan. Kiinnikettä kehitettiin työn ohessa tehden siihen pieniä muutoksia mittoihin ja reikien paikkoihin. Lopullista versiota kiinnikkeestä tilattiin ja sille tehtiin kuormituskokeita, joissa simuloitiin kiinnikkeen oikeita rasituksia. Kiinnike kesti sille kohdistuvat mitoituskuormat.

## ABSTRACT

**ANTTI MÄNNISTÖ:** Development of Stofix mounting system for polyurethane sheets

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 67 pages, 10 Appendix pages

Maj 2016

Master's Degree Programme in Building Technology

Major: Construction production

Examiner: Professor Matti Pentti

**Keywords:** Stofix, façade, brick, mounting system, polyurethane

The prices of apartments are high in Stockholm urban area. The average price per square meter is 88 000 Swedish Krona (9 360 euros). While energy requirements are becoming more strict is wall thicknesses becoming larger if ordinary solutions are used. When wall structures are thick means it less valuable square meters. With new wall solutions it is possible to build thinner walls and also fulfil energy requirements. More effective heat insulation enables thinner wall solutions. Polyurethane insulations are more effective insulations than mineral wools. 150 mm thick polyurethane sheet has similar heat resistance as 250 mm thick mineral wools. It is planned to use mineral wools insulation in Stofix façade system. In this system can be also used hard polyurethane sheets but there are some challenges. The objective of this study was to develop a new wall bracket to Stofix façade system which can be used with hard polyurethane sheets and remove problems which are faced with current mounting system. Goal was also to study structural physics of polyurethane insulated concrete walls.

First step of the study was to find out the loads which strain the wall bracket. Calculations of loads was based on Eurocodes which are used in Finland. Functionality of walls was studied in view of structural physics. Also acoustics were studied in this studied. There were four wall brackets and one of them was chosen in order to do more precise study. Functionality of the bracket was studied with statics and FEM -based program ANSYS. 3D model of the wall bracket was made and calculated with real design loads. The wall bracket was developed through the work doing little changes in dimensions and positions of holes. Final version of the bracket was ordered and tested. The wall bracket bore design loads.

## ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Stofix Ab:lle syksyn 2015 ja kevään 2016 aikana.

Diplomityössäni haluan kiittää Stofix Ab:n Matti Väyrystä hyvistä neuvoista ja mahdollisuudesta tämän työn tekemiseen. Haluan kiittää myös kaikkia muita tässä projektissa mukana olleita, sekä Professori Matti Penttiä työni tarkastamisesta ja tärkeistä neuvoista työn aikana.

Lisäksi haluan kiittää perhettäni, opiskelijatovereitani ja kaikkia, jotka ovat olleet mukana opiskelujeni aikana.

Erityisesti haluan kiittää Annaa, joka olet ollut tukenani opiskeluissani ja sen ulkopuolella.

Tukholmassa, 25 toukokuuta 2016

Antti Männistö

# SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
1.1	Tavoitteet.....	2
1.2	Rajaukset .....	2
1.3	Työn suoritus.....	2
2.	STOFIX.....	3
2.1	Stofix Oy .....	3
2.2	Stofix Ab .....	3
3.	NYKYINEN STOFIX –TIILIVERHOUSJÄRJESTELMÄ.....	4
3.1	Järjestelmä.....	4
3.1.1	Järjestelmä yleisesti.....	4
3.1.2	Järjestelmän käyttöikä.....	4
3.1.3	Runko .....	5
3.1.4	Tiililaattaelementti .....	7
3.2	Käyttökohteet .....	10
4.	KIINNITYSJÄRJESTELMÄÄN JA SEINÄRAKENTEESEEN KOHDISTUVAT VAATIMUKSET.....	14
4.1	Kuormitukset.....	14
4.1.1	Olosuhteet .....	14
4.1.2	Tuulikuorma.....	14
4.1.3	Oma paino .....	16
4.1.4	Lämpöliikkeet .....	17
4.2	Palotekniset vaatimukset.....	18
4.2.1	P1 ja P2 –paloluokan rakennukset .....	18
4.2.2	P3 –paloluokan rakennukset .....	20
4.3	Akustiikka .....	20
4.3.1	Ulkoseinään kohdistuvat akustiset vaatimukset.....	20
4.3.2	Ilmääneneristävyys.....	21
4.3.3	Ilmääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät.....	22
4.3.4	Ilmääneneristysluku $R_w$ ja spektripainotusermit C ja $C_{tr}$ .....	22
4.3.5	Ilmääneneristävyyden laskenta .....	24
4.4	Kosteus .....	26
4.4.1	Kosteusrasitukset .....	26
4.4.2	Kosteuden siirtymismuodot .....	29
4.4.3	PUR/PIR -eristetyn betoniseinän kosteustekninen toimivuus .....	31
4.5	Lämmöneristys .....	32
4.5.1	Lämmönläpäisykerroin .....	32
4.5.2	Kylmäsillat .....	33
4.5.3	Tuulensuoja.....	33
4.5.4	Seinärakenteen lämpötekkinen toiminta .....	35
5.	UUDEN KIINNIKEEN SUUNNITTELU.....	35

5.1	Käytettävät materiaalit .....	37
5.1.1	PUR/PIR -eriste.....	37
5.1.2	Teräslaatu .....	38
5.1.3	Kiinnitysalusta .....	38
5.2	Uuden kiinnikkeen hahmottelu .....	39
5.2.1	Vaihtoehto 1 .....	40
5.2.2	Vaihtoehto 2.....	41
5.2.3	Vaihtoehto 3.....	42
5.2.4	Vaihtoehto 4.....	42
5.3	Valitun kiinnikkeen toimivuuden analyysi .....	43
6.	KIINNIKKEEN TESTAUS.....	46
6.1	PUR/PIR -eristeen läpäisy.....	46
6.2	Kiinnikkeen teoreettinen laskenta .....	47
6.2.1	Kiinnikkeen teoreettinen laskentamalli.....	47
6.2.2	Kiinnikkeen analysointi ANSYS -ohjelmalla .....	49
6.3	Kiinnikkeen kokeellinen kuormittaminen.....	52
6.3.1	Testien suorittaminen.....	52
6.3.2	Ruuvien vetolujuus .....	53
6.3.3	Ruuvien kiinnitysmomentti ja kiinnikkeen nurjahtaminen.....	55
6.3.4	Maksimi veto.....	57
6.3.5	Maksimi puristus.....	59
6.3.6	Maksimi paino/veto alas. ....	61
7.	TULOKSIEN ANALYSOINTI JA LOPPUPÄÄTELMÄT.....	63
7.1	Kuormitustestien tulokset.....	63
7.2	Kiinnikkeen asentaminen .....	64
7.3	Asennuksessa muut huomioon otettavat asiat.....	65
8.	YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARVE.....	66
8.1	Yhteenveto .....	66
8.2	Jatkotutkimustarve .....	67
	LÄHTEET.....	68

LIITE 1: Vaadittujen eristepaksuuksien laskenta

LIITE 2: Lämpölaajenemisen voiman johtaminen

LIITE 3: Seinärakenteiden lämpöjakaumat

LIITE 4: Kuormituskokeiden tulokset

# 1. JOHDANTO

Energiatehokkuusvaatimukset kiristyvät ja lähes nollaenergiataso saavutetaan viimeistään vuonna 2020. Suomi on kuitenkin asetanut omaksi tavoitteekseen nollaenergiatasolle vuoden 2017, koska Suomi haluaa olla energiaviisauden kärkimaana (ERA 17). Kiristyvien energiatehokkuusvaatimuksien seurauksena seinäpaksuudet kasvavat tavanomaisilla ratkaisuilla. Ahtailla tonttialueilla ja erityisesti kaupunkirakentamisessa seinäpaksuuden lisääminen tarkoittaa huoneistoalan pienenemistä ja sitä kautta menetyksiä huoneistojen myyntihinnoissa. Tukholman alueella keskimääräinen neliöhinta on noin 88000 kruunua (Svensk Mäklarstatistik, 2016). Suomessa ja Ruotsissa kerrosalat lasketaan ulkoseinien ulkopinnan mukaan, mutta Suomessa ulkoseinäpaksuuden ylittäessä 250 mm voidaan kerrosala ylittää tämän mitan ylittävän osuuden aiheuttaman pinta-alan verran. Ruotsissa kerrosala lasketaan aina ulkoseinän ulkopinnan mukaan (Maankäyttö ja rakennuslaki 2014; Svensk Standard SS21054, 2009). Tämän takia ohuemmilla seinäratkaisuilla saadaan rakennukseen enemmän myytäviä asuineliöitä ja osa rakennuskustannuksista takaisin asuntojen myynnin kautta.

Seinäpaksuuksien kasvamista voidaan hillitä uusilla rakenneratkaisuilla, tuotteilla ja tehokkaammilla lämmöneristeillä, kuten polyuretaanieristeillä. Stofix Oy:n patentoima ohut tiiliverhousjärjestelmä on yksi esimerkki tällaisesta ratkaisusta. Ohuilla tiililaattaelementeillä voidaan rakentaa aiempaa ohuempaa perinteisen näköistä tiiliseinää. Yhdessä tehokkaampien lämmöneristeiden ja Stofix -julkisivujärjestelmän kanssa voidaan tuottaa energiatehokkuusvaatimuksen täyttäviä ohuempia ulkoseinäratkaisuja. Stofix -järjestelmän kanssa on suunniteltu käytettävän pehmeitä eristeitä, kuten kivi- ja lasivillaa. Tällä hetkellä Stofix -järjestelmän kanssa on käytetty muutamassa kohteessa kovaa polyuretaanieristettä, joka paremmalla lämmöneristävyysarvolla luo mahdollisuudet ohuempaan seinäratkaisuun. Kovan eristeen asentaminen pehmeän eristeen kanssa toimivaan järjestelmään luo kuitenkin haasteita. Haasteet koostuvat ylimääräisestä eristeen leikkaamisesta, liimaamisesta sekä eristeen joustamattomuudesta, joka aiheuttaa järjestelmän ylimääräistä säätämistä. Kova polyuretaanieste on myös hinnaltaan kalliimpaa kuin vastaava määrä pehmeää eristettä. Näistä haasteista johtuen kovan eristeen käyttäminen lisää eristeen asentamiseen käytettävää aikaa projekteissa ja aiheuttaa kustannuksia. Kovan polyuretaanilevyn kanssa toimiva järjestelmä poistaisi nämä ongelmat ja tekisi polyuretaanilevyeristeiden käytöstä kannattavampaa.

## 1.1 Tavoitteet

Diplomityön tavoitteena on kehittää Stofix -julkisivujärjestelmään kovien polyuretaanieristeiden kanssa toimiva seinäkiinnike ja poistaa nykyisen järjestelmän ongelmat polyuretaanieristeen asennuksessa. Lisäksi tavoitteena on selvittää polyuretaanieristeen kanssa vaatimustenmukaisia rakennusteknisesti toimivia seinäratkaisuja. Diplomityössä tutkitaan seinä rakenteiden akustista sekä palo-, lämpö- ja kosteusteknistä toimintaa. Tavoitteena on myös päivittää nykyisen järjestelmän asennusohje koskemaan uuden kiinnikkeen asennusta ja esittää ratkaisuja polyuretaanieristeen kanssa toimivista seinä rakenteista.

## 1.2 Rajaukset

Uuden kiinnikkeen ja seinäratkaisujen suunnittelu rajataan betonirunkoisiin rakennuksiin, koska Stofix:n projektikanta koostuu pääsääntöisesti betonirunkoisista rakennuksista.

## 1.3 Työn suoritus

Diplomityön alussa mietitään mahdollisia kiinnitysratkaisuja palavereissa, jotka antavat suuntaviivat tehtävälle kehitysprojektille. Suuntaviivojen avulla haetaan kirjallisuustutkimuksella standardeista ja viranomais määräyksistä uutta kiinnikettä ja seinäratkaisuja koskevat vaatimukset. Vaatimuksina käytetään Suomen vaatimuksia ja Suomea koskevia standardeja, koska maiden väliset erot vaatimuksissa ovat pieniä ja pääsy Suomen standardeihin onnistuu helposti TTY:n kautta. Kirjallisuutena käytetään pääosin RIL:n kirjasarjaa. Lähtövaatimusten ja selvitettyjen kuormien perusteella mietitään kiinnike-ehdotuksia ja seinäratkaisuja, joista valitaan tarkempaan selvitykseen yksi ehdotus ja toimivat seinäratkaisut. Kiinnikkeen kestävyyttä tarkastellaan teoreettisen laskennan ja FEM – pohjaisen Ansys -laskentatyökalun avulla. Laskennan jälkeen uutta kiinnikettä valmistetaan ja testataan käytännön kokeilla. Testien tuloksien perusteella arvioidaan kiinnikkeen toimivuutta. Lopussa arvioidaan diplomityön suoritusta, saatuja ratkaisuja ja esitetään jatkotutkimuksia vaativia asioita.



## **2. STOFIX**

### **2.1 Stofix Oy**

Stofix Oy on vahvasti kasvava suomalainen vuonna 1993 perustettu tuulettuvia julkisivutuotteita valmistama, myyvä ja asentava yritys. Yrityksen tavoitteena oli luoda toimiva julkisivujärjestelmä, joka vastaa nykyajan taloteknisiä ja muuttuvan rakennusteollisuuden vaatimuksia. Stofix Oy valmistaa poltetuista savitiililaatoista mittamoduloituja tiililaattaelementtejä ja metallirunkoista tuulettuvaa julkisivujärjestelmää. Omien tiililaattaelementtien valmistus aloitettiin vuonna 1997 Kangasniemen tehtaalla. Vuoden 1993 ja 1997 välissä Stofix Oy:n (ennen Stonel Oy) toiminta oli lähinnä tuotteen kehitystyötä. Silloin tiililaattaelementin muotoa, materiaaleja ja valmistustekniikkaa kehitettiin tuotantovalmiuteen. Vuonna 2009 tiililaattaelementtien tuotanto siirrettiin Kangasniemestä Oulaisten tehtaalle, jossa tiililaattaelementtien valmistus jatkuu tänäkin päivänä. Vuonna 2015 Stofix avasi toisen elementtitehtaan Puolaan. Tuotannon aloittamisen jälkeen kehitystyö on jatkunut kysynnän kasvaessa. (Stofix, 2016).

Stofix Oy valmistaa, myy ja asentaa elementtejä Suomen alueella, mutta se myy elementtejä myös ulkomaille. Stofix Oy:n tiilielementtejä ja kiinnikejärjestelmää myyviä yhteistyökumppaneita on Ruotsissa, Norjassa, Tanskassa, Hollannissa, Belgiassa, Ranskassa, Iso-Britanniassa ja Slovakiassa. (Stofix, 2016).

### **2.2 Stofix Ab**

Stofix Ab on Ruotsiin vuonna 2008 perustettu yritys joka myy ja asentaa Stofix Oy:n valmistamaa julkisivujärjestelmää. Stofix Ab toimii Ruotsissa omana yrityksenään Stofix Oy:n yhteistyökumppanina. Vuonna 2009 Ruotsiin valmistui ensimmäinen saneerauskohte, jossa käytettiin Stofix –julkisivujärjestelmää. Stofix Ab:n toiminta kasvaa vahvasti myös Ruotsissa. Kasvua on odotettavissa tulevina vuosina Ruotsin suuren asuntokannan vuoksi. Peruskorjattavaa rakennuskantaa Ruotsissa on paljon miljoonaohjelman (Miljonprogrammet) vuoksi. Vuosien 1965 ja 1974 välillä Ruotsiin rakennettiin yli miljoona asuntoa, jotka ovat nyt peruskorjauksen tarpeessa ikänsä vuoksi. (Stofix, 2016; Boverket, 2016).

### 3. NYKYINEN STOFIX –TIILIVERHOUSJÄRJESTELMÄ

#### 3.1 Järjestelmä

##### 3.1.1 Järjestelmä yleisesti

Stofix -tiiliverhousjärjestelmä vastaa ulkonäöltään perinteisesti tiilimuurattua julkisivua. Erona perinteiseen tiilimuurattuun julkisivuun on se, että Stofix:n elementeissä käytetään vain 20mm paksuja savitiililaattoja, mikä tekee tiilijulkisivusta normaalia muurausta kevyemmän. Stofix –järjestelmä elementteineen painaa noin 40 kg/m<sup>2</sup>, kun taas 120 mm paksu tiilimuri painaa noin 150 – 180 kg/m<sup>2</sup> riippuen tiilityypistä. Tiililaatat ovat aitoja poltettuja savitiililaattoja. Tiililaatat ovat kiinnitetty 0,7 mm paksuun sinkittyyn teräsohutelevyyn, joka yhdessä laastin kanssa muodostaa tiililaattaelementin. Yhteen ruuveilla sidotut tiililaattaelementit ovat ripustettu vapaasti roikkumaan teräksiseen kiinnitysjärjestelmään. Kiinnitysjärjestelmän kanto otetaan seinärakenteesta. Kiinnitysalustana toimivat kaikki materiaalit, jotka pystyvät kantamaan järjestelmästä aiheutuvat kuormat. Kiinnitysalustana voi olla niin puu-, teräs-, kevytbetoni-, betoni- kuin tiiliseinä. (Stofix, 2016).

##### 3.1.2 Järjestelmän käyttöikä

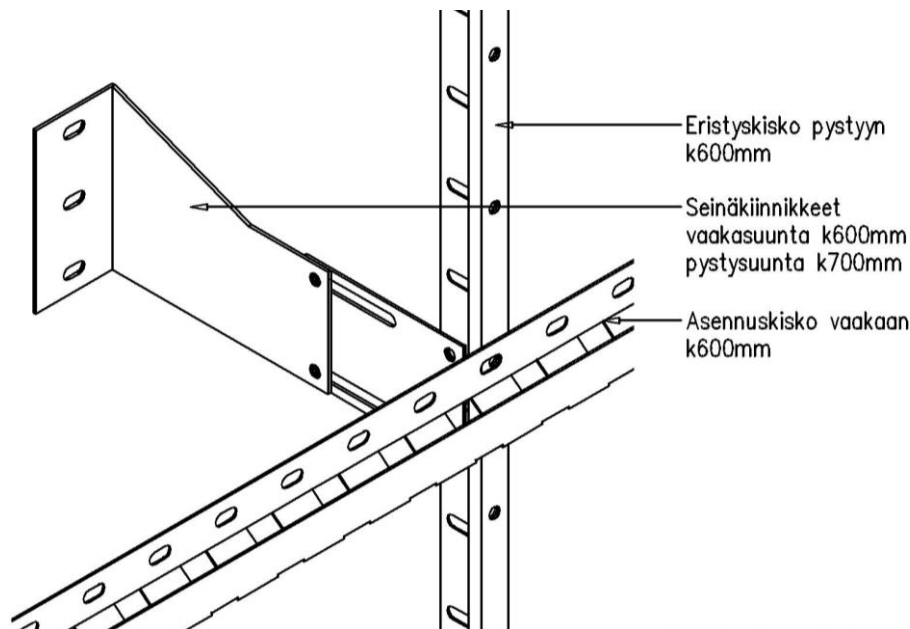
VTT (2009b) on tutkinut Stofix -julkisivujärjestelmän käyttöikää ja antanut järjestelmän rungolle 69 vuoden käyttöiän. Käyttöikä perustuu sinkityn terärungon sinkkikerroksen korroosionopeuteen. Asennuskiskojen ja eristyskiskojen sinkkitaso on 48µm (350 g/m<sup>2</sup>). Rastusluokassa C2 48 µm sinkkikerroksen kestävyys on 69 – 480 vuotta standardin ISO 14713:1999 mukaan. Joten todellisuudessa järjestelmän käyttöikä voi olla huomattavasti pidempikin kuin 69 vuotta. Tiilen ja laastin käyttöikää tarkastellaan kriittisten jäätymiskertojen avulla. Kriittisten jäätymisten lukumäärissä ei ole juuri eroa perinteisen tiilimuurin ja Stofix -elementtien välillä, mutta ohuen rakenteen ansiosta jäätymispaine pääsee purkautumaan helpommin verraten paksuun rakenteeseen. Tästä johtuen tiilin ja laastin käyttöikä Stofix -järjestelmässä on vähintäänkin yhtä pitkä kuin perinteisen tiilimuurin. (VTT, 2009b).

Julkisivujärjestelmän käyttöikä perustuu materiaalien lisäksi myös suurelta osin toimivaan tuuletukseen. Rei’itetty vaakasuuntainen asennuskisko jättää elementtien taakse toimivan tuuletusraon, joka poistaa järjestelmästä kosteutta. Ohuet savitiililaatat pystyvät kuivumaan kumpaankin suuntaan. Verraten normaaliin tiilimuriin Stofix -järjestelmässä

märkäaikatunteja yli 20 m rakennuksissa on vähemmän. Stofix -järjestelmässä märkäaikatunteja on 5309, kun tiilimuurissa niitä on 6090. Kosteusteknisesti Stofix -julkisivujärjestelmä on toimivampi kuin tiilimuuratut rakenteet. (VTT, 2009b).

### 3.1.3 Runko

Stofix –julkisivuverhouksen runko koostuu neljästä kuumasinkitystä teräksisestä rungonosasta (kuva 1) sekä runkoa sitovista kiinnikkeistä. Rungon osia ovat seinäkiinnikkeet, pystyyn tulevat eristyskiskot ja vaakaan asennettavat asennuskiskot. Käytettäessä isompia eristevahvuuksia jatketaan seinäkiinnikkeitä jatkokiinnikkeillä. Kiskot ja kiinnikkeet kiinnitetään toisiinsa M8x12 –kuusiokoloruuveilla tuotteissa oleviin valmiisiin kierrereikiin. Runko kiinnitetään seinärakenteeseen suunnittelijan määrittämällä kiinnitysruuvilla, joka määräytyy kiinnitysalustan mukaan. Kiinnitysruuvin valinta tehdään aina laskennallisin perustein ja kiinnitys tarkistetaan vetokokein. (Stofix, 2016).



**Kuva 1.** Runkojärjestelmä (Stofix 2016).

Materiaalit:

- Kuumasinkityt teräksiset seinäkiinnikkeet
  - o Vahvuus 2mm
  - o Sinkitys 275 g/m<sup>2</sup>
- Kuumasinkityt teräskisko; eristyskisko ja asennuskisko
  - o Vahvuus 1,25mm
  - o Sinkitys 350 g/m<sup>2</sup>
- Kiinnitysruuvi
  - o 6-kolo M8x12 8.8 ISO 7380. (Stofix, 2016).

Stofix –järjestelmän seinäkiinnikkeet kiinnitetään seinään vaakajaaolla k600 ja pystysuunnassa k700 (kuva 2). Kuusiokoloruuvien, valmiiksi uurrettujen ruuvireikien ja pitkänmallisten reikien avulla järjestelmä voidaan säätää oikealle tasolle.

Kiinnikkeiden ja eristyskiskojen asennuksen jälkeen niiden väliin asennetaan lämmöneristeet. Eristeet kiinnitetään eristyskiinnikkeillä seinään ja saumat teipataan (kuva 3). Järjestelmään voidaan asentaa 30-350 mm lämmöneristettä, mutta järjestelmä voidaan asentaa myös kylmäasennuksena eli ilman lämmöneristettä. Tällöin järjestelmässä käytetään joko normaalia järjestelmää tai pelkästään pystyyn asennettavia Z-kiskoja ja vakaan asennettavia asennuskiskoja. Jos seinäpinta on suora, voidaan käyttää myös pelkästään asennuskiskoa.



**Kuva 2.** Kiinnitysjärjestelmä asennettuna betoniseinään. Kv. Följa Berg, Nacka



**Kuva 3.** Lämmöneristeet ja tuulensuojaeriste asennettu ja kiinnitetty. Eristeiden saumat teipattu. Kv. Korttryttaren, Vällingby

Eristeiden asennuksen jälkeen asennuskiskojen varaan asennetaan roikkumaan tiililaattaelementit, jotka sidotaan toisiinsa poraruuveilla.

#### 3.1.4 Tiililaattaelementti

Tiililaattaelementti (kuva 4) koostuu sinkitystä teräsohuttelevystä, savitiililaatoista ja saumalaastista. Standardikokoisen elementin koko on 1200 mm x 600 mm eli 0,72 m<sup>2</sup>. Tiilikokoja voidaan käyttää erikokoisia, mutta tiilen paksuus on pääsääntöisesti 20 mm, muutamia poikkeuksia lukuun ottamatta. Tiililimitykset, saumapaksuudet ja tiilen suunnat voivat vaihdella.



**Kuva 4.** Suora elementti 275x75mm kivellä ja 1/3 –tiililimityksellä

Tiililaattaelementeissä käytetään savesta poltettuja tiililaattoja. Ne valmistetaan joko suoraan oikeaan paksuuteen tai tiililaatat voidaan myös leikata normaalikokoisista tiilistä. Saumoissa käytetään polymeerimodifioitua sementtilaastia, jolla on 4% elastisuus. Työmaasaumauksessa käytetään samaa saumalaastia, mutta jäykempää, jotta se pysyy valumatta paikoillaan vaakasuoralla pinnalla. Elastinen sauma säilyy ehjänä lämpöliikkeiden jälkeenkin.

Materiaalit:

- Kuumasinkitty teräsrunko
  - Vahvuus 0,7 mm
  - Sinkitys 350 g/m<sup>2</sup>
- Tiili
  - Paksuus 20 mm
  - Leveys x korkeus 218 – 370 x 48 – 85 mm
  - Pakkasen kestävä poltetu savitiili
- Saumalaasti
  - Polymeerimodifioitu sementtipohjainen saumamassa (elastisuus 4%)

Tiililaattaelementit asennetaan vapaasti roikkumaan asennuskiskojen varaan. Elementti-seinän kokoaminen aloitetaan vasemmasta alakulmasta, josta asentamista voi jatkaa ylös tai oikealle. Elementit sidotaan toisiinsa saumojen kohdalta poraruuvein (kuva 5 ja 6).





**Kuva 5.** Elementit asennettu asennuskiskojen varaan. Kv. Följa Berg.



**Kuva 6.** Elementit ruuvattu yhteen elementtien saumoista poraruuveilla. Kv. Följa Berg.

Tiililaattojen saumat saumataan elementtien sidonnan jälkeen sementtipohjaisella saumalaastilla (kuva 7). Saumalaastin ollessa vielä märkää saumalaasti tasoitetaan oikealla tasolle ja saumojen pinnalle puhalletaan saumahiekkää, joka viimeistelee julkisivusta yhtenäisen kokonaisuuden. (kuva 8).



*Kuva 7. Elementtien saumat saumattu. Sundsvall.*



*Kuva 8. Märän sauman päälle puhalletaan saumahiekka. Sundsvall.*

Lopputuloksena saumauksen kuivumisen jälkeen syntyy perinteisen näköinen ja saumaton tiilijulkisivu.

### **3.2 Käyttökohteet**

Stofix – julkisivujärjestelmää voidaan käyttää uudis- ja korjausrakentamisessa. Pääpaino järjestelmän käytössä on kuitenkin korjausrakentamisen puolella. Julkisivujärjestelmä voidaan kiinnittää betoniin, metalliin, tiileen ja puurunkoon. Kiinnikepinnan lujuus varmistetaan laskennallisesti ja kiinnikeruuvien kestävyys vetokokein. Rakenteen keveyden ansiosta ei uutta sokkeliä tarvitse tehdä, vaan vanha seinärakenne kantaa kokonaan julkisivujärjestelmän painon. (Stofix, 2016).

Järjestelmän etuna perinteiseen tiilimuuriin on sen ohuus ja keveys. Tiilielementtien paksuus on vain 21 mm, mikä antaa korjauskohteissa lisätilaa eristeelle (kuva 9). Tämä etu



on eduksi saneerauskohteissa, joissa vanha tiilijulkisivu halutaan purkaa ja remontoida. Vaikka rakennuksen ulkonäköä ei voida muuttaa esimerkiksi rakennusluvan takia, soveltuu Stofix –julkisivujärjestelmä korjaustavaksi, sillä lopputuloksena on perinteisen näköinen tiilijulkisivu. Vaihdettaessa perinteinen tiilijulkisivu ohuempaan Stofix –julkisivuun voidaan julkisivuun lisätä eristettä 50 mm - 100 mm, jolloin seinärakenteen U-arvoa voidaan parantaa. Kaiken kaikkiaan voidaan Stofix -järjestelmässä käyttää 0 – 350 mm eristevahvuuksia. Tuulettuva rakenne ja kiskojen muotoilu poistavat elementtien taakse päässeeseen kosteuden ja kuivattaa mahdollisesti kastuneen mineraalivillan. Rakenteen kuivuminen on tärkeää, sillä mineraalivillan eristävyys voi jopa puolittua sen kastuessa (Powel & Matthews, 1987). (Stofix, 2016).



**Kuva 9.** Betoniseinään asennettu Stofix –tiilijulkisivujärjestelmä. (Stofix, 2016).

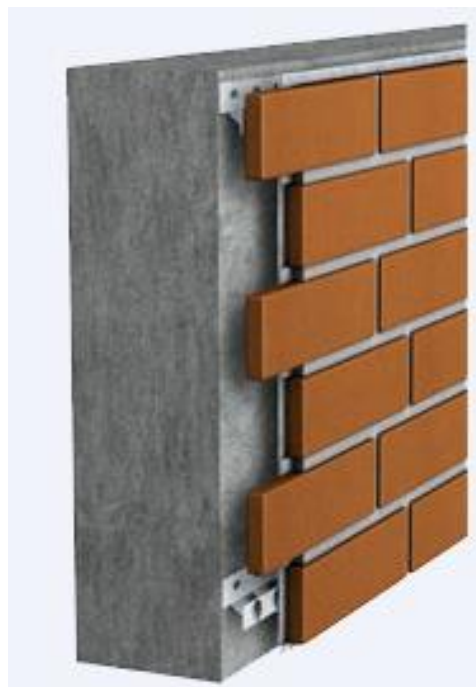
Järjestelmä voidaan asentaa myös vanhan julkisivun päälle, jos se kestää ja ulkoseinien paksuutta voidaan kasvattaa (kuva 10). Tällöin seinää voidaan lisäeristää tai uudistaa pelkästään kylmäverhouksella, jolloin seinää ei lisäeristetä. (kuva 11.) Tarvittaessa vanhaa julkisivua vahvistetaan, jotta se pystyy kantamaan uuden julkisivun tuoman lisäkuorman. Lisälämmöneristyksen tuomia etuja ovat:

- Pakkasrapautumisen pysähtyminen
- Vanhan rakenteen lämpötila nousee mikä edistää rakenteen kuivumista ja estää vaurioiden etenemisen.
- Seinärakenteen U-arvon paraneminen
- Uusi tiiliverhous (Stofix, 2016)



**Kuva 10.** Vanhan julkisivun päälle asennettu Stofix –järjestelmä lisäeristyksen kanssa (Stofix, 2016).

Korjattaessa vanhoja julkisivuja tulee yleensä lisälämmöneristämisen kyseeseen. Kylmäverhousta käytetään lähinnä uudiskohteissa, jolloin tiiliverhouksella on lähinnä esteettinen merkitys.



**Kuva 11.** Uuden/vanhan betoniseinän päälle kylmäverhouksena asennettu Stofix –järjestelmä. (Stofix, 2016)

Kylmäverhouksella saadaan julkisivu näyttämään perinteiseltä tiilimuuraukselta. Se ei kuitenkaan vaadi erillistä kantavaa sokkeliä. Kylmäverhous on myös nopea vaihtoehto korjausrakentamistavaksi, jolloin vanha seinä ei ole vielä niin vaurioitunut, että purkaminen olisi ajankohtaista. Vanha julkisivu voidaan kylmäverhoilla Stofix –järjestelmällä, joka estää vanhan seinärakenteen kastumisen. Vanha seinä rakenne kuivuu uuden julkisivun takana ja vaurioituminen voidaan pysäyttää. (Stofix, 2016).

Stofix –järjestelmää voidaan käyttää erittäin laajasti niin korjaus- kuin uudisrakentamisen puolellakin. Järjestelmä ei kuitenkaan ole kantava rakenne, joten se vaatii aina kiinnikepinnan mihin se kiinnitetään.

## 4. KIINNITYSJÄRJESTELMÄÄN JA SEINÄRAKENTEeseen KOHDISTUVAT VAATIMUKSET

### 4.1 Kuormitukset

Stofixin projektit koostuvat suurimmaksi osaksi keskikorkeista kerrostaloista. Projekteja on myös yli kymmenkerroksisten kerrostalojen joukossa, joten kuormien tarkastelu kannattaa tehdä korkeiden kerrostalojen mukaan, jotta tulokset kattavat suurimman osan Stofixin tulevista projekteista. Kuormituksia tarkastellaan eri kuormitustapausten avulla. Vaihtoehtoisista etsitään kaikista kuormittavin tapaus, jolle uusi kiinnike tullaan suunnittelemaan. Kuormitustapaukset on esitelty alemmissa luvuissa. Kuormituksiin sisältyy rakenteen oma massa, tuulikuorma ja lämpöliikkeiden tarkastelu.

#### 4.1.1 Olosuhteet

Olosuhteiksi valitaan tavanomainen kaupunkiympäristö, joka kattaa suurimman osan Stofixin projekteista. Tuulikuormitukset määräytyvät standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaan. Kaupunkiympäristö antaa standardin mukaan maastoluokka 3:en. Rakennuksen korkeutena käytetään 30m korkeaa kerrostaloa, joka vastaa 10-kerroksista kerrostaloa. Omasta painosta tulee rakenteeseen pysyviä kuormituksia, hyötykuormia ei seinärakenteeseen kohdistu. Yleiset kuormat lasketaan standardin SFS-EN 1991-1-1 mukaan.

#### 4.1.2 Tuulikuorma

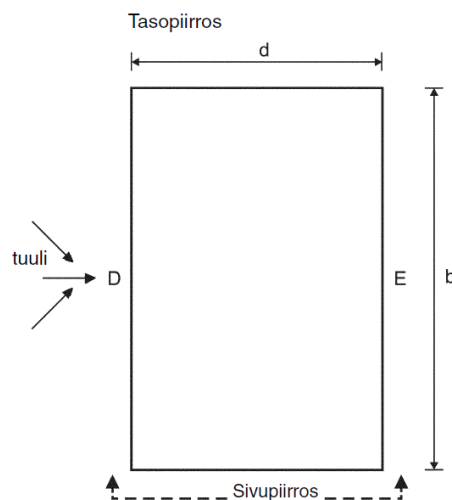
Standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaan kaupunkiympäristössä sijaitseva rakennus lasketaan maastoluokka III:n mukaan. Tiheämmässä kaupunginosassa käytettäisiin maastoluokkaa IV, mutta tuolloin kuormat olisivat pienemmät, joten kuormitukset lasketaan maastoluokka III:n mukaan, joka antaa maastoluokka IV:sta epäedullisemmat kuormat. (SFS-EN 1991-1-4).

Rakennuksen eri osien tuulikuormien arvot perustuvat puuskanopeuspaineeseen  $q_p$  [kN/m<sup>2</sup>], joka taas riippuu maastoluokasta, maaston tasaisuudesta ja rakennuksen korkeudesta (RIL 201-1-2011). Puuskanopeuspaine tasaisessa maastossa saadaan taulukosta 1.

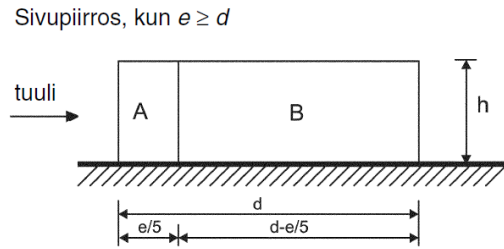
**Taulukko 1.** Nopeuspaineen ominaisarvo  $q_p(z)$  [kN/m<sup>2</sup>] eri maastoluokissa tasaisessa maastossa (RIL 201-1-2011)

z (m)	Maastoluokka				
	0	I	II	III	IV
0	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
1	0,66	0,42	0,39	0,35	0,32
2	0,78	0,52	0,39	0,35	0,32
5	0,96	0,65	0,53	0,35	0,32
8	1,05	0,73	0,61	0,43	0,32
10	1,09	0,76	0,65	0,47	0,32
15	1,18	0,83	0,72	0,55	0,40
20	1,24	0,88	0,77	0,60	0,45
25	1,29	0,92	0,82	0,65	0,50
30	1,33	0,95	0,85	0,68	0,54
35	1,37	0,98	0,88	0,72	0,57
40	1,40	1,01	0,91	0,74	0,60

Taulukosta 1 saadaan puuskanopeuspaineeksi  $q_p = 680 \text{ N/m}^2$  30 metrisessä rakennuksessa tasaisessa maastossa. Puuskanopeuspaineen avulla voidaan ratkaista tuulikuormat rakennuksen eri osissa. Standardin SFS-EN 1991-1-4 mukaan suurin imu kohdistuu seinäalueelle A ( $c_{pe,1} = -1,4$ ) ja suurin paine seinäalueelle D ( $c_{pe,1} = +1,0$ ). Seinäalueet ovat esitetty kuvissa 12 ja 13.



**Kuva 12.** Mitoitettavan rakennuksen tasopiiirros (SFS-EN 1991-1-4, kuva 7.5).



**Kuva 13.** Mitoitettavan rakennuksen sivupiirros (SFS-EN 1991-1-4, kuva 7.5).

Tuulikuorma ratkaistaan kaavasta (4).

$$W_e = c_{pe,net} \cdot q_p(z_e), \quad (4)$$

jossa  $W_e$  on ulkopintaan vaikuttava tuulenpaine,  $q_p(z_e)$  on puuskanopeuspaine ja  $c_{pe,net}$  on ulkoisen paineen painekerroin. Tässä käytetään  $c_{pe,1}$ . (SFS-EN 1991-1-4).

Ratkaistaan suurin imukuorma neliömetrin alueelle kaavasta (4).

$$W_e = -1,4 \cdot 680 \frac{N}{m^2} = -952 \frac{N}{m^2} \quad (4)$$

Samasta kaavasta (4) ratkaistaan myös suurin tuulenpaine seinälle.

$$W_e = 1,0 \cdot 680 \frac{N}{m^2} = 680 \frac{N}{m^2} \quad (4)$$

Näitä kuormia käytetään myöhemmissä luvuissa olevissa kuormituslaskelmissa. Yhdelle kiinnikkeelle tulevat kuormat lasketaan vielä erikseen riippuen kiinnikkeiden jaoista pystyyn ja vaakaan. Nykyisessä järjestelmässä seinäkiinnikeitä on 2,38 kpl/m<sup>2</sup>.

### 4.1.3 Oma paino

Rakenteen omapaino koostuu tiililaattaelementeistä, asennuskiskoista, eristyskiskoista ja jatko- sekä seinäkiinnikkeistä, jotka ovat esitetty aiemmissa luvuissa. Tiililaattalevyn massa on  $m = 40 \text{ kg/m}^2$  standardikokoisella 285x85x20 kokoisilla tiililaatoilla verhoiluna. Kiinnikejärjestelmä painaa  $m = 4,1 \text{ kg/m}^2$ . Yhteensä julkisivujärjestelmä painaa  $m = 44,1 \text{ kg/m}^2$ . Massa muutetaan Newtoniksi kaavalla (5).

$$F = m \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} \quad (5)$$

jossa  $F$  [N] on voima ja  $m$  [kg] kappaleen massa.

Nyt järjestelmän omaksi painoksi saadaan kaavalla (5)

$$F = 44,1 \frac{kg}{m^2} \cdot 9,81 \frac{m}{s^2} = 432,6 \frac{N}{m^2} \quad (5)$$

#### 4.1.4 Lämpöliikkeet

Lämpölaajeneminen on materiaalin ulkomittojen muutosta lämpötilavaihtelujen seurauksena. Lähes kaikki materiaalit muuttavat muotoaan lämpötilan muutoksen vaikutuksesta. Lämmitessään materiaalit laajenevat ja kylmetessään ne kutistuvat. Lämpölaajenemisen suuruus riippuu materiaalin lineaarisesta lämpölaajenemiskertoimesta  $\alpha$ . Kaikilla materiaaleilla muutos ei kuitenkaan ole lineaarista, mutta teräksellä se on. Lämpölaajenemiskerroin  $\alpha$  ilmaistaan esimerkiksi yksikössä mm/mm °C, joka kertoo yhden dimension muutoksen millimetreissä yhden celsiusasteen muutoksessa. Lämpölaajenemiskerroin voidaan myös ilmaista kertoimen avulla, esimerkiksi  $5 \cdot 10^{-6}/\text{°C}$ . (ASM 2002).

Stofix -julkisivujärjestelmä on rakennuksen ulkopintaan asennettava järjestelmä. Ilmatieteen laitoksen (2016) tilastojen mukaan Suomessa lämpötilavaihtelut voivat olla jopa yli 88 °C vuodessa, mikä aiheuttaa suuria lämpöliikkeitä metallirunkoon. Jos lämpölaajeneminen estetään, ovat lämpöliikkeiden kuormat niin suuria, että niitä ei voida näillä rakenteilla estää. Lämpöliikkeen aiheuttama voima  $F$  [N] voidaan laskea kaavalla 6, joka on johdettu kaavasta 7. Kaavan johtaminen on esitetty liitteessä 2.

$$F = \alpha \cdot \Delta T \cdot E \cdot A \quad (6)$$

jossa  $\Delta T$  [°C] on lämpötilan muutos,  $E$  [GPa] on materiaalin kimmomoduuli ja  $A$  [mm<sup>2</sup>] kuormittavan pinnan pinta-ala. Kaavalla voidaan laskea esimerkiksi asennuskiskon aiheuttama kuorma lämpötilamuutoksen ollessa 70 °C. Teräksen lämpölaajenemiskerroin on  $12 \cdot 10^{-6} \text{ 1/°C}$  (ASM 2002), kimmomoduuli 200 GPa ja puristava pinta-ala 120 mm<sup>2</sup>. Näillä arvoilla lämpölaajenemisen aiheuttama puristava kuorma  $F = 20160 \text{ N}$ . Mikä vastaa 2055 kg kuormaa. Jos kiskon kummankin pään liike estetään, se ei kestä tätä kuormaa nurjahtamatta. Lämpöliikkeiden vaikutuksen minimoimiseksi järjestelmässä otetaan lämpöliikkeet huomioon liikuntasaumoilla ja kiskojen liitoksissa. Julkisivujen mitat voivat olla leveydeltään jopa 100 m ja korkeudeltaan yli 30 m. Suurimmat lämpöliikkeet tapahtuvat näin asennus- ja eristyskiskoissa. Kiskojen materiaalina käytetään kuumasinkittyä kylmävalssattua terästä DX51D. Teräs sisältää rautaa yli 97 -paino% ja hiiltä 0,18 paino% (Ruukki 2016). Kappaleiden pituuden lämpöpiteneminen lasketaan kaavalla 7 (Salmi, Pa-junen 2010).

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0 \quad (7)$$

jossa  $\Delta L$  pituuden muutos,  $\Delta T$  lämpötilan muutos ja  $L_0$  kappaleen alkuperäinen pituus. Mikäli rakennuksen suoran julkisivun pituus on yli 12 m tulee julkisivuun liikuntasauva 7,5 m välein. Sama sääntö pätee myös rakennuksen korkeudessa. Mikäli asennuskiskot ovat asennettu toisiaan päin ja kummatkin päät kiinni tiiliverhoiluun, voidaan lämpöliikkeet laskea 12 m matkalle. Eristys- ja asennuskiskot ovat molemmat samaa materiaalia, joten seuraava laskelma pätee molempien pituuden muutokseen. Kaavasta 7 saadaan tulokseksi pituuden muutokseksi 12,24 mm, kun  $L_0$  on 12 m ja  $\Delta T$  on 70 °C. Tämä tarkoittaa

sitä, että jos reunimmaisten kiskojen päät olisivat päin kulmaelementtejä tulisi alueen pintaan noin 12mm repeämä, riippuen saumojen elastisuudesta.

## 4.2 Palotekniset vaatimukset

Rakennukset jaetaan kolmeen eri paloluokkaan P1, P2 ja P3, P1 –luokan ollessa näistä vaativin. P1 –luokan rakennuksien oletetaan pääsääntöisesti kestävän palossa sortumatta. Rakennuksen paloluokka määräytyy sen käyttötarkoituksen mukaan ja se luo vaatimukset eri rakennusosille ja sitä kautta materiaaleille. Rakennusosat määritellään eri luokkiin niiden palonkeston mukaan ajallisesti. Palonkestävyyttä kuvataan kolmella kirjaimella R, E ja I sekä numerolla joka kuvastaa palonkestoja minuuteissa. R kuvaa kantavuutta, E tiiviyyttä ja I eristävyyttä. Esimerkiksi rakennusosa, jolla on paloluokka REI60 tarkoittaa sitä, että rakennusosa säilyttää kantavuutensa (R), tiiviytensä (E) ja eristävyytensä (I) 60 minuutin mittaisessa tulipalossa. (Suomen RakMK E1, 2011).

Rakennusosissa käytettävät rakennustarvikkeet jaetaan paloluokkiin niiden paloon osallistumisen, pisaroinnin ja savun tuoton mukaan. Taulukossa 2 on esitetty merkinnät ja niiden selitykset. (Suomen RakMK E1, 2011).

**Taulukko 2.** Rakennustarvikkeiden paloluokat. (Suomen RakMK E1, 2011).

A1	Tarvikkeet, jotka eivät osallistu lainkaan paloon.
A2	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on erittäin rajoitettu.
B	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyvin rajoitettu.
C	Tarvikkeet, jotka osallistuvat paloon rajoitetusti.
D	Tarvikkeet, joiden osallistuminen paloon on hyväksyttävissä.
E	Tarvikkeet, joiden käyttäytyminen palossa on hyväksyttävissä.
F	Tarvikkeet, joiden käyttäytymistä ei ole määritetty.
s1	Savuntuotto on erittäin vähäistä.
s2	Savuntuotto on vähäistä.
s3	Savuntuotto ei täytä s1 eikä s2 vaatimuksia.
d0	Palavia pisaroita tai osia ei esiinny.
d1	Palavat pisarat tai osat sammuvat nopeasti.
d2	Palavien pisaroiden tai osien tuotto ei täytä d0 eikä d1 vaatimuksia.

Tässä työssä tutkitaan ulkoseinärakennetta, jossa osana eristävää rakennetta käytetään PUR/PIR –eristettä. Polyuretaanieristeistä tarkemmin luvussa 5.1.1.

### 4.2.1 P1 ja P2 –paloluokan rakennukset

Stofix:n projektit koostuvat lähinnä asuinkerrostaloista, jolloin vaaditut paloluokat vaihtelevat P1 ja P2 –paloluokkien välillä. P1 –paloluokan rakennuksissa kantavien rakenteiden oletetaan kestävän palotilanteet sortumatta eikä rakennuksilla ole muita rajoituksia.



P2 -luokassa vaatimustasot ovat P1 –paloluokkaa matalampia, mutta rakennusmateriaaleille on asetettu erillisiä vaatimuksia ja rakennuksen kokoa ja henkilömääriä on rajoitettu. P2 –paloluokassa kerrosluku on rajoitettu enintään 4 kerrokseen. Tällöin suurin osa kohteista, asuinkerrostaloista, on paloluokaltaan P1. Rakenteiden kantavuuden lisäksi rakennusmateriaaleille on omat vaatimuksensa. (Suomen RakMk E1, 2011).

Yli 8-kerroksisten rakennuksien kantaville rakenteille vaatimuksena on R240. Tämä paloluokka koskee kantavia seinärakenteita. Stofix –julkisivujärjestelmä ei ole itsestään kantava järjestelmä, joten ulkoseinän paloluokkavaatimuksien täyttämiseksi kantavan betoniseinän tulee täyttää paloluokan asettamat vaatimukset. Kantavien betoniseinien paksuudet ja terästen suojamäärät ovat esitetty taulukossa 3.

**Taulukko 3.** Kantavien betoniseinien vähimmäismitat ja keskiöetäisyyden vähimmäisarvot (SFS-EN 1992-1-2, 2005).

Standardipalonkestävyys	Vähimmäismitat (mm)			
	Seinän paksuus / keskiöetäisyys			
	$\mu_{fi}=0,35$		$\mu_{fi}=0,7$	
	alistus toiselta puolelta	alistus molemmilta puolilta	alistus toiselta puolelta	alistus molemmilta puolilta
1	2	3	4	5
REI 30	100/10*	120/10*	120/10*	120/10*
REI 60	110/10*	120/10*	130/10*	140/10*
REI 90	120/20*	140/10*	140/25	170/25
REI 120	150/25	160/25	160/35	220/35
REI 180	180/40	200/45	210/50	270/55
REI 240	230/55	250/55	270/60	350/60
* Tavallisesti standardin SFS EN 1992-1-2 edellyttämä betonipeitteen paksuus on määräävä. $\mu_{fi}$ on hyväksikäyttöaste palotilanteessa				

Hyväksikäyttöaste lasketaan kaavalla (6)

$$\mu_{fi} = \frac{N_{ed,fi}}{N_{Rd}} \quad (6)$$

Missä  $N_{ed,fi}$  on normaalivoiman mitoitusarvo palotilanteessa ja  $N_{Rd}$  on seinän kestävyysmitoitussarvo normaalissa lämpötilassa. (SFS-EN 1992-1-2, 2005).

P1 –paloluokassa vaatimuksia asetetaan myös rakenteissa käytettäviin materiaaleihin. P1 –luokan rakennuksessa ulkoseinissä tulee käyttää pääosin B-s1, d0 -luokan rakennustarvikkeita. Lämmöneristeen ollessa luokkaa B-s1, d0 huonompaa, tulee se suojata niin, että palon leviäminen estetään eristykseen. Tuuletusvälin sisäpinta tulee suojata luokan A-s1,

d0 tai B-s1, d0 vaatimukset täyttävällä materiaalilla. Käytännössä tämä tarkoittaa polyuretaani eristeen (myöhemmin PUR/PIR) suojaamista paloluokan täyttävällä eristyksellä, kuten kivivillalla tai vaatimukset täyttävällä rakennuslevyllä. Rappaus ei suojaa yleensä riittävästi. PAROC:in kivivilloilla on paloluokitus A1, pois lukien Tyvek -tuulensuojaperillä päällystetyt tuulensuojalevyt, joiden paloluokka on F. Rakentamismääräyskokoelman C4 mukaan eristyksen suunnittelun arvon saavuttamiseksi tulee käyttää tuulensuojaa, jonka ilmanläpäisykerroin saa olla enintään  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{m}^2\text{sPa}$ . Tuuletusrakoon rajoittuvan eristeen pitää täyttää siis vaatimukset ilmanläpäisystä ja paloluokasta. PAROC:in cortex -eristeet ovat paloluokaltaan A2-s1, d0. Cortex tuulensuoja eristeitä voidaan täten käyttää P1 luokan rakennuksissa ja toimii näin suojaavana kerroksena takan olevalle PUR/PIR-eristeelle. On olemassa myös B-s1, d0 -luokan PUR/PIR -eristeitä, joissa eriste on pinnoitettu toiselta puolelta paloluokan täyttävällä erikoispinnoitteella. Esimerkiksi Kingspanin Therma TW57 -eriste on paloluokaltaan B-s1, d0 (Kingspan 2016). VTT:n sertifikaatin (VTT sertifikaatti 2016) mukaan Kingspan Therma<sup>TM</sup> -eristettä voidaan käyttää enintään 16 kerroksisissa rakennuksissa eristämiseen ja tiivistämiseen. Korkeammissa rakennuksissa PUR/PIR -eristeitä voidaan käyttää yhdessä vaatimuksien täyttävien eristeiden kanssa, kuten PAROC:in cortex -tuulensuojaeristeet.

#### 4.2.2 P3 –paloluokan rakennukset

P3 –luokassa riittävä turvallisuustaso palotilanteiden suhteen saavutetaan rajoittamalla rakennuksien kokoa ja henkilömäärää. P3 –paloluokassa rakenteille ei aseteta erityisiä vaatimuksia rakennusmateriaaleille. PUR/PIR –eristeiden käyttäminen P3 –paloluokan rakennuksissa on sallittua, mikäli muut vaatimukset täyttyvät. Vaatimukset voivat koostua rakenteiden kosteusteknisestä toimivuudesta, eristävydestä tai akustisista ominaisuuksista. P3 –luokan rakennuksia ovat pääsääntöisesti omakotitalot ja pienet rivi- ja kerrostalot. (Suomen RakMK E1, 2011).

### 4.3 Akustiikka

Tässä luvussa esitellään betonirakenteisen PIR -eristetyn seinän akustista toimintaa. Olennaisena vaatimuksena on, että rakennus suunnitellaan ja rakennetaan niin, että ulkoa tuleva melu pysyy niin alhaisena, että se mahdollistaa työskentelyn, nukkumisen tai muun rakennuksen käyttötarkoituksen mukaisen toiminnan terveyttä vaarantamatta. (RakMk C1, 1998).

#### 4.3.1 Ulkoseinään kohdistuvat akustiset vaatimukset

Rakennuksen ulkovaipalle voidaan asettaa asemakaavassa tietty ääneneristysvaatimus. Ääneneristysvaatimus esitetään sisälle kantautuvan melun enimmäisarvoina. Melutasojen ohjearvoista määrätään valtioneuvoston päätöksessä 993/1992, jotka ovat esitetty taulu-

kossa 4. Ulkoseinien ääneneristysvaatimus määritetään rakenteeseen kohdistuvan äänitason mukaan. Ulkoa tulevasta melutasosta vähennetään taulukon 4 mukainen sallittu äänitaso, jolloin saadaan rakenteen vaadittava ääneneristysarvo. Ääneneristysarvoa merkitään  $\Delta L_A$  [dB]. On kuitenkin suositeltavaa, että ulkovaipan ääneneristysarvo on aina vähintään 30 dB, jotta sisätiloissa saavutetaan riittävä asuinviihtyvyys. (Rakennusteollisuus, 2009).

**Taulukko 4.** Melutasojen ohjearvot sisätiloissa (Rakennusteollisuus, 2009)

Korkeimmat sallitut melun A-painotetun ekvivalenttitason ohje-arvot	Päiväaikaan $L_{A,eq,7-22}$ [dB]	Yöaikaan $L_{A,e1,22-7}$ [dB]
Asuin-, potilas- ja majoitushuoneissa	35	30
Opetus- ja kokoontumistiloissa	35	-
Liike- ja toimistohuoneissa	45	-

Kaavamääräys koskee tietyn puoleisen seinäalueen vaipan muodostamaa kokonaisuutta. Kaikkien rakennusosien ei tarvitse saavuttaa vaadittua ääneneristysarvoa, mutta kokonaisuudessaan seinärakenteen tulee täyttää sille asetettu ääneneristysvaatimus. Jos ääneneristysvaatimukset ovat korkeita, on sillä suuria vaikutuksia rakenteisiin. Tällöin voi olla järkevää vaikuttaa ääneneristysarvoihin tilojen sijoittelulla. (Rakennusteollisuus, 2009). Korkeaa ääneneristävyttä vaativat tilat kannattaa sijoittaa sille puolelle rakennusta, jossa melutasot ovat pienempiä tai tila voidaan sijoittaa myös rakennuksen sisälle, niin ettei sillä ole kosketusta ulkoseiniin. Tällöin ulkoa tuleva melu ei kohdistu suoraan sen tilan rakenteisiin.

### 4.3.2 Ilmaääneneristävyys

Rakennuksen sisälle tulevaa ääntä rajoitetaan ilmanäänieristyksen avulla. Ilmaääneneristävyys  $R$  [dB] määritellään rakenteen läpi siirtyneen tehon avulla kaavan 8 mukaan.

$$R = 10 \lg \frac{W_1}{W_2} \quad (8)$$

Jossa  $W_1$  on äänilähteen teho ja  $W_2$  toiselle puolelle siirtynyt ääniteho. Ilmaääneneristävyys tarkoittaa, että kun ilmaääneneristysluku on 10 dB siirtyy toiseen tilaan kymmenesosa siihen osuvasta äänitehosta. 30 dB ilmaääneneristävyysluvun omaava seinä päästää läpi tuhannesosan äänitehosta ja 60 dB seinä miljoonasosan. Ilmaääneneristävyys riippuu äänen taajuudesta. Tietyillä rajataajuuksilla materiaalien ominaisuudet muuttuvat. Rajataajuudet riippuvat materiaalien jäykkyydestä, paksuudesta ja massasta, jolloin ilmaääneneristävyys on koko rakennusosan muodostaman kokonaisuuden ominaisuus. Rakenteiden ääneneristävyysluvut esitetään kolmannesoktaavikaistoittain taajuuksille 50 Hz – 5000 Hz standardin ISO 717-1 mukaan. (Kylliäinen, 2006).

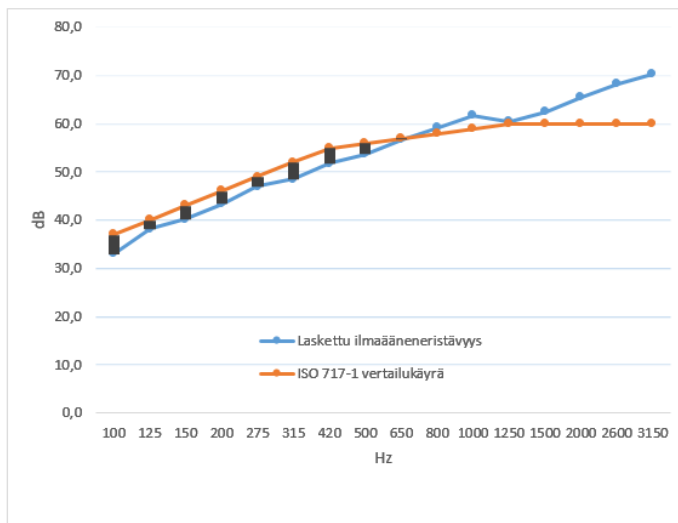
### 4.3.3 Ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat tekijät

Ilmaääneneristävyyteen vaikuttavat eniten rakenteen rakoisuus ja pintamateriaalin absorptiokyky. Tiiliverhoiluissa rakenteessa ulkopinnassa on ei-huokoinen materiaali, joka ei näin myöskään absorboi ääntä. Suurin osa raoista johtuu työmaalla tapahtuvista virheistä, joista suurin osa kohdistuu rakenteiden liitoksiin. Yleisemmin työvirheitä on esimerkiksi ikkunoiden ja ovien liitoksissa. Massiivisissa rakennuksissa vuodot johtuvat useimmiten huonosti valetuista liitoksista. Eniten tiiviyn puutos vaikuttaa korkeilla, yli 500 Hz taajuuksilla. (Kylliäinen & Hongisto, 2007).

### 4.3.4 Ilmaääneneristysluku $R_w$ ja spektripainotustermi $C$ ja $C_{tr}$

Ilmaääneneristävyysarvoja on vaikea käyttää, koska ilmaääneneristävyyden arvo riippuu taajuudesta. Tästä syystä ilmaääneneristävyydelle on kehitetty yksinumeroinen esitystapa, ilmaääneneristysluku  $R_w$ .  $R_w$  on ilmaääneneristysarvojen painotettu keskiarvo. Ilmaääneneristysluku määritetään standardin ISO 717-1 mukaan. Laboratoriossa saaduille arvoille käytetään merkintää  $R_w$  ja kenttäolosuhteissa saadulle arvoille merkintää  $R'_w$ , jolle myös rakenteiden vaatimukset esitetään. Ilmaääneneristysluku määritetään standardin ISO 717-1 vertailukäyrän avulla. Vertailukäyrää siirretään 1 dB askelin käyrän muotoa muuttamatta niin, että epäsuotuisten poikkeamien summa ei ylitä arvoa 32 dB. Epäsuotuisiksi poikkeamiksi luetaan ne arvot, jolloin mittaustulos on vertailukäyrän alapuolella. Kun ehto täyttyy, luetaan ilmaääneneristysluvun arvo  $R_w$  vertailukäyrältä 500 Hz:n kohdalta (kuva 14). (RIL 243-1-2007).

Taajuus	Laskettu ilmaääneneristävyys	ISO 717-1 vertailukäyrä	Ei-toivottu poikkeama
f [Hz]	R [dB]	[dB]	[dB]
100	33,0	37	4,0
125	38,2	40	1,8
150	40,2	43	2,8
200	43,4	46	2,6
275	47,0	49	2,0
315	48,5	52	3,5
420	51,8	55	3,2
500	53,7	<b>56</b>	2,3
650	56,7	57	0,3
800	59,1	58	0,0
1000	61,7	59	0,0
1250	60,4	60	0,0
1500	62,4	60	0,0
2000	65,5	60	0,0
2600	68,2	60	0,0
3150	70,2	60	0,0
Summa			22,5



**Kuva 14.** Rakenteen ilmaääneneristysluku luetaan vertailukäyrältä 500 Hz:n kohdalta, kun ei-toivottujen poikkeamien summa on 32 dB tai alle (RIL 243-1-2007).

Lähtökohtaisesti ilmaääneneristysluku kertoo miten hyvin rakenteet eristävät puheääntä asuntojen välissä. Ulkoa tuleva melu, kuten tieliikenne- raide- tai lentomelu, poikkeavat

puheäänestä. Pelkkä ilmaääneneristysluku ei toimi näille meluille hyvänä arvona. Ilmaääneneristyslukua on korjattu niin, että siihen on lisätty spektripainotusermit C ja C<sub>tr</sub>. C spektripainotusermi korjaa ilmaääneneristyslukua niin, että se vastaa taajuusjakaumaltaan paremmin asunto-, raide- ja lentoliikennemelua ja spektripainotusermi C<sub>tr</sub> vastaa tieliikennemelua. Spektripainotusermin tarkoituksena on ottaa huomioon ilmaääneneristävyys pienillä taajuuksilla, joita syntyy tie-, raide- ja lentomelusta. Nyt voidaan liikennemelun ilmaääneneristysluku ilmaista yksinumeroisena lukuna R<sub>A,tr</sub> [dB] joka saadaan ilmaääneneristysluvun ja spektripainotusermin summana R<sub>w</sub> + C<sub>tr</sub>. (Kylliäinen & Hongisto 2007).

Spektripainotusermit lasketaan standardin ISO 717-1 vertailukäyrien avulla. Molemmille spektripainotusermeille C ja C<sub>tr</sub> on omat vertailukäyrät, jotka on esitetty taulukossa 5. Spektripainotusermi lasketaan kaavalla 9.

$$C_i = -10 \log \sum 10^{(L_{ij} - R_i)/10} - R_w \quad (9)$$

jossa alaindeksi *i* viittaa taajuuteen ja *j* spektripainotusermiin. R<sub>i</sub> [dB] on ilmaääneneristävyys taajuudella *i* ja R<sub>w</sub> rakenteen ilmaääneneristysluku. Spektripainotusermi C saa arvoja välillä 0 ... -2 dB ja C<sub>tr</sub> -2 ... -5 dB. Jos taajuusaluetta laajennetaan 50 Hz asti, vaihtelevat arvot välillä -5 ... -15 dB. (Kylliäinen & Hongisto, 2007).

**Taulukko 5.** Spektripainotusermien laskemisessa käytettävät äänispektrit (Kylliäinen & Hongisto, 2007)

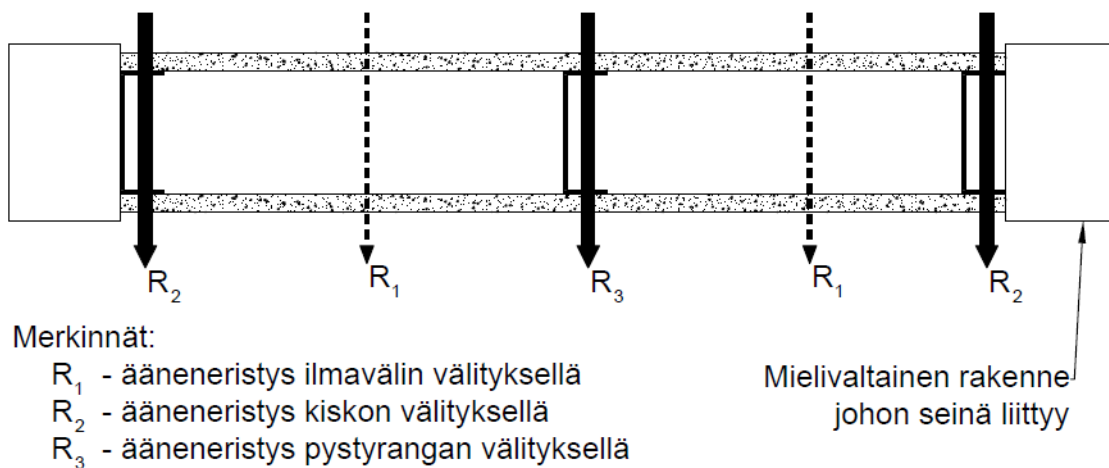
Taajus [Hz]	C	C <sub>tr</sub>
	L <sub>ij</sub> [dB]	L <sub>ij</sub> [dB]
50	-	-25
63	-	-23
80	-	-21
100	-29	-20
125	-26	-20
160	-23	-18
200	-21	-16
250	-19	-15
315	-17	-14
400	-15	-13
500	-13	-12
630	-12	-11
800	-11	-9
1000	-10	-8
1250	-9	-9
1600	-9	-10
2000	-9	-11
2500	-9	-13

3150	-9	-15
4000	-	-16
5000	-	-18

#### 4.3.5 Ilmaääneneristävyyden laskenta

Ulkoseinärakenne koostuu betoniseinästä, polyuretaanieristelevystä, kivivillasta (paloluokan niin vaatiessa), ilmapälistä ja tiililaattaelementeistä. Tiililaattaelementit ovat kiinnitetty jäykillä kiinnikkeillä betonirunkoon.

Ulkoseinärakenne on kaksinkertainen. Kytkeättömän kaksinkertaisen rakenteen ääneneristävyyden laskeminen on helpompaa, koska ääni voi kulkeutua rakenteen toiselle puolella vain yhtä reittiä, ilmapälin läpi. Tällöin rakenne toimii massa-jousi-massa systeiminä, jossa rakenteiden välissä oleva absorboiva materiaali estää kaiun. Mikäli ilmapälinissä ei ole lainkaan absorboivaa materiaali on rakenteen ilmaääneneristävyys pahimmillaan 20 dB pienempi, kuin rakenne, jonka ilmapäli on täytetty absorboivalla materiaalilla. Kytetyssä kaksinkertaisessa rakenteessa ääneneristävyyden laskeminen vaikeutuu, koska äänienergia siirtyy rakenteen läpi kolmen eri reitin kautta (kuva 15). (RIL 243-1-2007).



**Kuva 15.** Kytentä rangoin ja kiskoin (RIL 243-1-2007)

Eniten ääneneristävyyttä heikentävät dynaamisesti jäykät rangat. Mitä joustavammat rangat ovat, sitä parempi on rakenteen ääneneristävyys. Ääneneristävyys paranee myös vähentämällä rankojen määrää ja kiinnitystä. Jäykkärangaisessa seinässä äänen kulkeutuminen rankojen kautta on määräävä. Rangoilla kytketyn seinän ääneneristävyyteen ei vaikuta ilmapälin absorptiomateriaali niin paljoa kuin kytkeättömän rakenteen ääneneristävyyteen. Jäykkärunkoisen seinän ilmapälin absorptiomateriaalin merkitys onkin lähes merkityksetön. Ilmapälinissä absorptiomateriaali voidaan käyttää lähinnä palomääräysten vuoksi (RIL 243-1-2007).

Jäykällä rungolla kytketyn kaksikerroksisen seinän ääneneristävyyden lähtökohdaksi voidaan ottaa tällöin koko seinä massalakiarvo  $R_M$  [dB] kaavalla (9).

$$R_M = 20 \log_{10} [m'_1 + m'_2] f - 48 \text{ dB} \quad (9)$$

jossa  $m'_1$  [kg/m<sup>2</sup>] on toisen puolen kappaleen pintamassa,  $m'_2$  on toisen puolen pintamassa ja  $f$  [Hz] taajuus. Ilmaääneneristävyys voidaan laskea kaavalla 9 siltataajuuteen  $f_{br}$  [Hz] asti. Siltataajuuden yläpuolella alkaa rankojen ääneneristystä heikentävä vaikutus. Siltataajuuden yläpuolella seinän ääneneristävyys  $R_{br}$  voi saavuttaa korkeintaan arvon  $R_M + \Delta R_M$ . Siltataajuus  $f_{br}$  lasketaan kaavalla (10) ja  $\Delta R_M$  kaavalla (11). (RIL 243-1-2007).

$$f_{br} = f_{mam} \left( \frac{\pi b f_c}{2 c_0} \left( \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} \right)^2 \right)^{1/4} \quad (10)$$

jossa  $f_{mam}$  [Hz] on massa – ilma - massan resonanssitaajuus (kaava 12),  $f_c$  [Hz] on koinsidenssin rajataajuus (kaava 13),  $b$  [m] etäisyys rankojen välillä,  $c_0$  [m/s] äänennopeus ilmassa,  $m'_1$  [kg/m<sup>2</sup>] ensimmäisen kappaleen pintamassa ja  $m'_2$  toisen kappaleen pintamassa.

$$\Delta R_M = 10 \log_{10} (b f_c) + 20 \log_{10} \frac{m'_1}{m'_1 + m'_2} - 18 \text{ dB} \quad (11)$$

$$f_{mam} = 80 \sqrt{\frac{m'_1 + m'_2}{d m'_1 m'_2}} \quad (12)$$

jossa  $d$  [m] on ilmapälin paksuus.

$$f_c = \frac{c^2}{2\pi} \sqrt{\frac{m' 12(1 - \mu^2)}{E h^3}} \quad (13)$$

jossa  $\mu$  [kerroin] on Poissonin suhde,  $E$  [N/m<sup>2</sup>] kimmomoduuli ja  $h$  [m] levyn paksuus. Poissonin suhde riippuu materiaalista. Betonille, rakennuslevyille ja lasille  $\nu = 0,25$ . Metalleille  $\nu = 0,3$  ja kumille ja bitumille  $\nu = 0,4$ . Koinssidenssin rajataajuus on taajuus, jolloin ilmassa ja materiaalissa etenevän äänen taajuus on sama. Tällöin materiaali estää hyvin huonosti ääntä liikkumaan materiaalissa ja ääneneristys heikkenee. (RIL 243-1-2007).

Stofix -järjestelmällä verhoillun 150 mm paksun betoniseinän, jossa on 100mm poluretaanilevy, ilmaääneneristävyyksiksi saatiin  $R_w = 59$  dB. Raide- ja lentoliikennemelun ilmaääneneristävyydeksi saatiin  $R_w + C = 58$  dB ja tieliikennemelun ilmaääneneristävyydeksi  $R_w + C_{tr} = 54$  dB.

Betoniseinän massan vuoksi seinärakenteella on hyvä ilmaääneneristävyys. Jäykkä elementtien kiinnitys lisää rakenteen ääneneristävyyttä hieman, mutta suurta vaikutusta sillä

ei ole, koska betoniseinän massa on niin suuri. Ilmavälin absorptiomateriaalilla ei ole juurikaan merkitystä seinärakenteen ilmaääneneristävyyteen jäykkien liitosten vuoksi. Polyuretaanieristeen rakenteen vuoksi sen äänenvaimennusominaisuudet ovat kuitenkin mineraalivillaa huonommat. Eristävälissä käytettäessä huokoista mineraalivillaa, voidaan saavuttaa parempi ilmaääneneristävyys liikennemelua vastaan (SPU, 2016). Betonirunkoisessa rakennuksessa ilmaääneneristävyys on kuitenkin hyvä, riippumatta eristetyypistä ilmavälissä. (RIL 243-1-2007).

## 4.4 Kosteus

Suurimmat ongelmat rakenteissa johtuvat yleensä rakenteiden väärästä kosteusteknisestä toiminnasta. Vääränlainen rakenne ei päästä rakennetta kuivumaan tarpeeksi tehokkaasti, mikä johtaa siihen, ettei rakenne ehdi kuivumaan ennen seuraavaa siihen kohdistuvaa kosteusrasitusta. Jatkuvan kosteusrasituksen alla olevat rakenteet luovat homeille niiden vaatiman kasvupohjan. Homeet kasvavat rakenteissa, joissa on niille otolliset olosuhteet. Homekasvustot aiheuttavat myöhemmin sisäilmaongelmia homeitiöiden kulkeutuessa sisäilmaan. Suurin osa kosteusvaurioista syntyy juoksevasta vedestä, kuten sateesta, valumavesistä, kapillaarisesti nousevasta kosteudesta, putkivuodoista tai pesuvesistä (Vinha & Käkälä 2001). Rakentamismääräyskokoelmassa C2 vaatimuksena on, että rakennus on suunniteltava ja rakennettava niin, ettei kosteuden kertymisestä rakennuksen eri osiin tai sisäpinnoille ole terveydellistä tai hygieenistä haittaa. Rakenteen on pystyttävä kastuessaan kuivumaan, niin ettei se aiheuta haittaa. Tässä luvussa tutkitaan ulkoseinärakenteen toimintaa PUR/PIR -eristettä käytettäessä. Alumiini tai muovipohjaisella laminaatilla pinnoitetut PUR/PIR -eristeet toimivat rakenteessa höyrynsulkuna, mikä pitää ottaa huomioon rakenteita suunniteltaessa. Lähtökohtaisesti höyrynsulku asennetaan aina rakenteen lämpimälle puolelle. Itse eristeen toimiessa höyrynsulkuna, pitää rakenteen kosteusteknistä toimintaa tutkia tarkemmin.

### 4.4.1 Kosteusrasitukset

Seinärakenteeseen kohdistuvia rasituksia syntyy seinään osuvasta viistosateesta, ilman kosteudesta ja rakentamisen aikaisesta kosteudesta. Myös rakennuksen käytöstä rakenteisiin voi joutua kosteutta. Riippuen ilmankosteudesta ja lämpötilasta materiaalit myös sitovat ja luovuttavat kosteutta hygroskooppisesti.

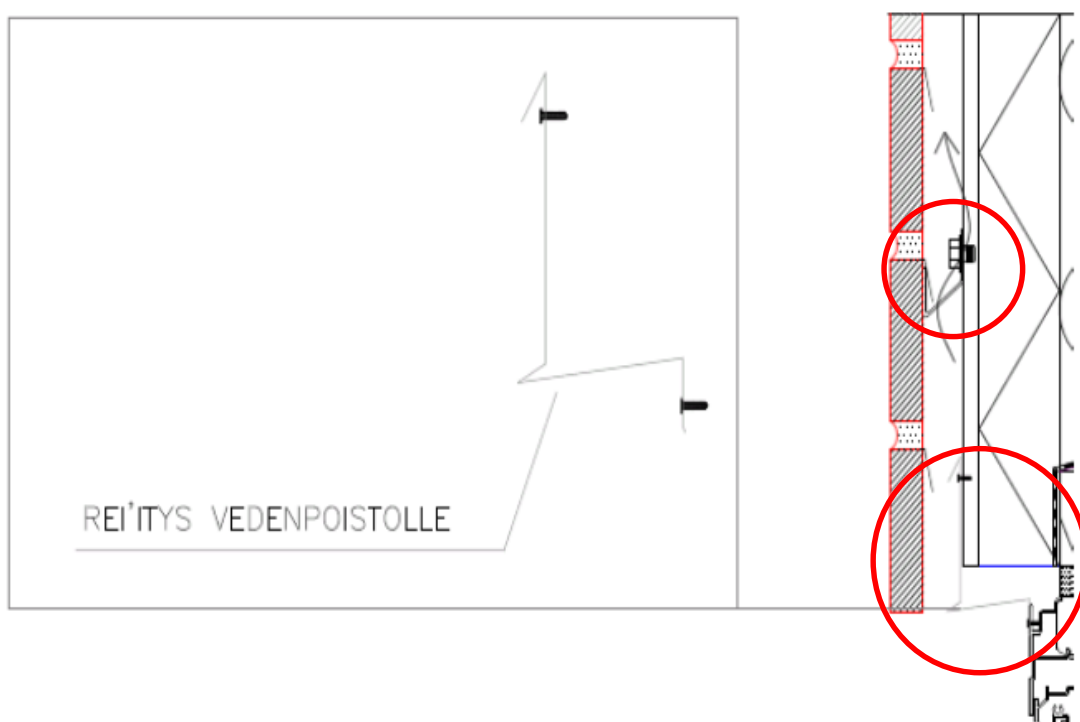
#### Sade

Merkittävin kosteusrasituksista on sade. Vesi voi sataa alas vetenä, räntänä tai lumena. Tuulen ja sateen yhteisvaikutuksena vesi sataa viistosti kohti ulkoseinärakennetta. Viistosateeseen yhdistettynä räntänä satava vesi on sateista kastelevin. Räntä voi jäädä kiinni verhoukseen, jolloin sen kasteleva vaikutus jatkuu normaalia sadetta pidempään. Tuulenpaineen vaikutuksessa rakenteen pinnassa oleva vesi voi liikkua ylöspäin, josta johtuen



vesi voi päästä verhoilun taakse tuuletusrakojen kautta. Edellä mainituista syistä viistosade on yksi eniten kosteusvaurioita aiheuttavista tekijöistä. (Siikanen, 2014).

Ilman pyörteiden ja seinäpaineiden vaikutuksesta viistosateiden suurimmat vaikutukset kohdistuvat rakennusten nurkkiin ja yläosiin (Björkholtz, 1997). Räystäiden avulla suuriin osa seinärakenteiden yläosaan kohdistuvista sateista voidaan estää. Räystäättömissä rakennuksissa seinärakenteiden yläliitoksiin pitää kiinnittää erityistä huomiota. Liitokset pitää olla tarpeeksi tiiviitä, ettei vesi pääse satamaan suoraan rakenteiden sisälle. Ulko-verhoillussa rakenteessa verhoilun taakse pääsevän veden pitää päästä poistumaan tuuletumalla, mikäli sitä ei muulla tavoin pystytä varmistamaan (RarkMK C2, 1998). Stofix -julkisivujärjestelmässä tuuletusrako on suunniteltu niin, että se toimii samalla vedenohjausjärjestelmänä. Vedenohjausjärjestelmä on esitetty kuvassa 16.



**Kuva 16.** Stofix -julkisivujärjestelmän vedenohjausjärjestelmä (Stofix, 2012)

VTT Expert Services Oy (Stofix, 2015) on myöntänyt Stofix -julkisivujärjestelmälle ETA:n hyväksynnän, josta selviää julkisivujärjestelmän vedenohjauksen toimivuus. Tuuletusraon toteuttavat asennuskiskot ovat muodoltaan sellaisia mitkä ohjaavat veden pois päin eristeistä alaspäin. Järjestelmän alaosassa oleva pellitys ohjaa edelleen veden pois järjestelmästä.

### Ilmankosteus

Vesi liikkuu rakenteisiin myös ilmassa vesihöyrynä. Vesihöyrystä ilmassa sanotaan ilmankosteudeksi. Ilma pystyy sitomaan kosteutta tietyn määrän riippuen sen lämpötilasta.

Lämpimämpi ilma pystyy sitomaan vesihöyryä enemmän kuin kylmä ilma. Esimerkiksi 20 celsiusasteen lämpöinen ilmaa pystyy sitomaan vettä 17,28 g/m<sup>3</sup>, kun taas -10 celsiusasteen ilma voi sitoa vettä vain 2,2 g/m<sup>3</sup> (Lindberg 2004). Ilman kyllästyskosteus voidaan laskea kaavalla (7) (Björkholtz, 1997).

$$v_k = 4,85 + 3,47 \frac{t}{10} + 0,945 \left(\frac{t}{10}\right)^2 + 0,158 \left(\frac{t}{10}\right)^3 + 0,0281 \left(\frac{t}{10}\right)^4 \quad (7)$$

jossa  $t$  [°C] on lämpötila -20 °C ... +80 °C. Vesihöyryn osapaine  $p_v$  [Pa] voidaan laskea kyllästyskosteuden avulla kaavalla (8).

$$p_v = v_k \cdot 461,4 \cdot T \cdot 10^{-3} \quad (8)$$

jossa  $v_k$  [g/m<sup>3</sup>] on kyllästyskosteus ja  $T$  [°C] on tarkasteluhetken lämpötila. Mitä enemmän vesihöyryä on sitoutunut ilmaan, sitä suurempi on sen osapaine. Osapaineella tarkoitetaan vesihöyryn painetta ilman kaikkien kaasujen yhteenlasketuista paineista, kokonaispainesta. Osapaineet ovat syy siihen, miksi vesihöyry tunkeutuu rakenteisiin – kostea ilma pyrkii tasaantumaan pienemmän osapaineen ilmaan. Talviaikaan ulkoilma on kylmää, eikä se pysty sitomaan kosteutta paljoakaan, kun taas rakennuksen sisällä oleva lämmin ilma pystyy sitomaan enemmän kosteutta. Kosteusero sisä- ja ulkoilman välillä johtuu sisällä tapahtuvasta kosteudentuotosta. Talviaikaan myös ilmanvaihto on pienempää, jolloin kosteus ei poistu niin nopeasti. Kosteustuoton takia rakennuksen sisällä olevan ilman osapaine on ulkoilman osapainetta suurempi ja näin sisäilman kosteus pyrkii tasaantumaan rakenteiden läpi ulkoilman kanssa. Tasaantuminen tapahtuu konvektion ja diffuusion avulla. Kosteuden siirtymismuodoista kerrotaan luvussa 4.4.2. (Björkholtz, 1997)

Ilman sisältämästä kosteudesta käytetään nimitystä suhteellinen kosteus. Suhteellinen kosteus tarkoittaa ilmassa olevaa vesimäärä suhteessa kyllästyskosteuteen. Suhteellinen kosteus, Relative Humidity (RH), ilmoitetaan prosentteina. Se voidaan laskea kaavoilla (9) ja (10).

$$RH = \frac{v}{v_k} \quad (9)$$

jossa  $v$  [g/m<sup>3</sup>] on mitattu kosteusarvo ja  $v_k$  [g/m<sup>3</sup>] on kyllästyskosteus.

$$RH = \frac{p}{p_k} \quad (10)$$

jossa  $p$  [Pa] on mitattu paine ja  $p_k$  [Pa] on kyllästyspaine. Jos vesimäärä ylittää kyllästyskosteuden ( $RH > 100\%$ ) alkaa vesi tiivistyä.

### Rakennekosteus

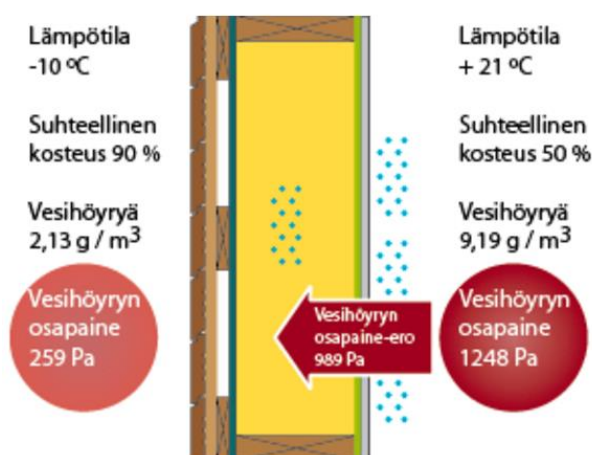
Rakennekosteus on kosteutta, joka on sitoutuneena rakenteisiin. Kosteus voi sitoutua rakenteisiin ympäröivästä ilmasta, kun se yrittää tasaantua ympäristön kanssa. Rakenteisiin

kosteutta voi johtua konvektiolla, hygroskooppisesti tai suoraan vedestä imeytyen. Rakennekosteus voi siis olla rakenteessa vesihöyrynä tai nesteinä. Kosteus voi olla rakenteessa kiinteästi tai löyhästi. Kiinteästi oleva ei poistu materiaalista muuta kuin kuumentamalla materiaalia, löyhästi oleva kosteus poistuu materiaalista vapaasti haihtumalla. (Björkholtz 1997).

Kosteuden määrään rakenteessa vaikuttaa suuresti materiaalin säilöntätapa, kosteusrasitukset ja ilmankosteus. Rakenteen kosteuteen vaikuttaa myös sen valmistusprosessi ja huokoisuus. Huokoinen materiaali imee kosteutta ympäristöstä ja sen kosteus tasaantuu lähelle ympäristön kosteutta. Kosteat materiaalit päinvastoin taas kuivuvat ollessaan ympäristöään kosteampia. Osapaine-eroista johtuen materiaali kuivuu tai kostuu. (Björkholtz 1997).

#### 4.4.2 Kosteuden siirtymismuodot

Kosteus siirtyy rakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksesta. Diffuusio tarkoittaa kemiallisessa mielessä molekyylien siirtymistä vahvemmassa pitoisuudesta laimeampaan. Rakennusteknisesti se tarkoittaa vesihöyryn osapaineiden jakautumista ympäristön kanssa. Mitä enemmän ilmassa on vesihöyryä, sitä korkeampi on sen osapaine. Talviaikaan sisäilmassa on enemmän vesihöyryä kuin ulkoilmassa vaikka sisäilman suhteellinen kosteus olisi alhaisempi. Siitä johtuen osapaine tasaantuu seinärakenteiden läpi ulkoilmaan (kuva 17). Kesäaikaan vesihöyryn liike voi olla myös toiseen suuntaan. Eri materiaaleilla on eri diffuusiovastuksia mitkä vaikuttavat tasaantumisnopeuteen. (Tiivistalo 2016).



**Kuva 17.** Vesihöyryn kulkeutumisuuunta talviaikaan (Tiivistalo 2016)

Materiaalien kykyä vastustaa diffuusiota kuvataan diffuusiovastusluvulla  $\mu$ . Se kertoo, kuinka paljon tiiviimpää se on verrattuna saman paksuiseen kerrokseen ilmaa. Eräiden materiaalien diffuusiovastuslukuja on esitetty taulukossa 6.

**Taulukko 6.** *Materiaalien diffuusionvastuslukuja (Tiivistalo 2016)*

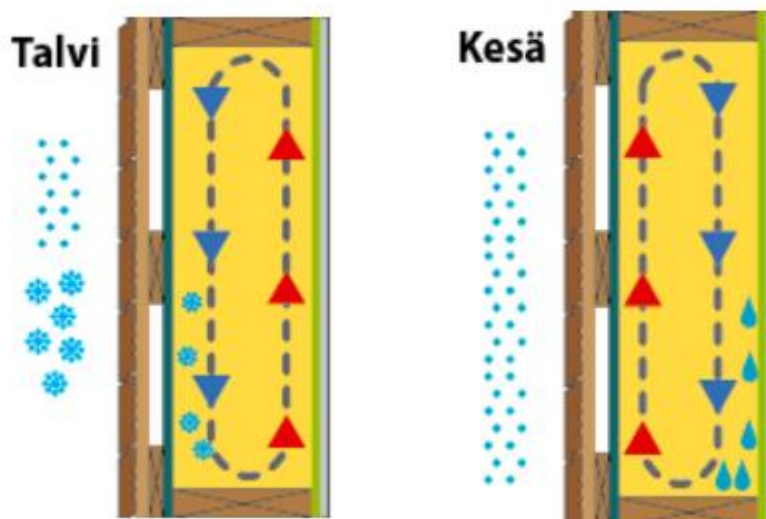
Materiaalien diffuusionvastuslukuja [ $\mu$ ]	
Mineraalivillat	n.2
Puukuitulevyt	n. 5
PU eristeet	n. 50
Betoni	n. 100
Maalit	n. 500
Höyrynsulkupaperi	n. 10 000
PE -höyrynsulkukalvot	n. 250 000
PE -kelmut	n. 1 000 000

Diffuusionvastusluvusta voidaan laskea rakenteen diffuusionvastus  $sd$ . Diffuusionvastus lasketaan kertomalla diffuusionvastusluku rakenteen paksuudella  $s$  [m] (kaava (11)).

$$sd = \mu \cdot s \quad (11)$$

Osapaineista johtuvan ilmankosteuden tasaantumisen vuoksi rakenteet tulisi suunnitella niin, että ulkopinnassa olevat materiaalit läpäisevät kosteutta paremmin kuin sisäpinnassa, lämpimällä puolella olevat materiaalit. Tällöin rakenne pääsee kuivumaan ulkopintaa kohden. Tästä syystä sisäpinnassa käytetään yleensä korkean diffuusionvastuksen omaavia materiaaleja, kuten muovisia höyrynsulkuja. Ulkopinnassa olevien materiaalien pitää taas olla pieniä diffuusionvastukseltaan, jotta rakenteiden sisään päässyt kosteus pääsee haihtumaan ja rakenteet kuivumaan. (Tiivistalo, 2016).

Konvektiossa kosteus siirtyy rakenteeseen ilman mukana vesihöyrynä paine-erojen vaikutuksesta tai vetenä. Paine-erot pyrkivät tasaantumaan ja tasaantuminen tapahtuu rakenteiden vuotokohtien kautta kastellen näin rakennetta. Eristeiden sisällä tapahtuu myös konvektiota ilmanpaine-erojen vaikutuksesta (kuva 18) ja eristeen lämpötilaeroista. Rakenteissa oleva lämmin ilma nousee ylöspäin kylmän painuessa alas aiheuttaen konvektiota eristeen sisällä.



**Kuva 18.** Konvektio eristeiden sisällä (Tiivistalo, 2016)

Konvektiossa ilma kiertää avohuokoisen eristeen sisällä kuljettaen myös kosteutta, joka ilman jäähtyessä tiivistyy. Sisäisen konvektion nopeus riippuu rakenteen paksuudesta. Paksummassa rakenteessa konvektio on nopeampi. Rakenteen kasvaessa myös konvektion nopeus kasvaa eksponentiaalisesti. Kosteuden määrä ei lisäännä konvektiossa, mutta rakenteille, josta kosteus ei pääse poistumaan konvektio on haitaksi. Tällöin konvektio nopeuttaa kosteusvaurioiden syntyä. (Tiivistalo, 2016).

#### 4.4.3 PUR/PIR -eristetyin betoniseinän kosteustekninen toimivuus

Tässä työssä tutkitaan rakennetta, jossa kantavan betonirungon päälle on asennettuna PUR/PIR -eristelevy ja kivivilla. PUR/PIR -eristeestä enemmän luvussa 5.1.1. PUR/PIR -eristeen paksuus vaihtelee lämmöneristystarpeen mukaan. Kivivillaa käytetään, mikäli rakennuksen palosuojaus sitä vaatii. Liitteestä 1 selviää, että uudisrakentamisen puolella betonirunkoisella seinällä vaadittuun U -arvoon ( $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$ ) (RakMk C3 2010) pääsy vaatii vähintään 150mm PUR/PIR -eristettä (U -arvo silloin  $0,151 \text{ W/m}^2\text{K}$ ). Jos rakenteessa käytetään 50 mm kivivillaa PUR/PIR -eristeen lisäksi, riittää 100 mm PUR/PIR -eristelevy kivivillan kanssa saavuttamaan vaaditun U -arvon (U -arvo  $0,165 \text{ W/m}^2\text{K}$ ).

Talviaikaan vesihöyryn kulkusuunta on sisältä ulospäin. Pääsääntönä on, että rakenteen vesihöyrynvastus pienenee sisältä ulospäin. PUR/PIR -eristettä käytettäessä suurimman vesihöyrynvastuksen omaava PUR/PIR -eristelevy on rakenteen keskellä. Betonirakenne päästää ajan mittaan kosteutta ulospäin rakenteesta, mutta PUR/PIR -eristelevyn kohdalla kosteusvirta lähes pysähtyy, mikä tarkoittaa sitä, että betoniseinän ja PUR/PIR -eristelevyn välin suhteellinen kosteus voi nousta. PUR/PIR -eristeen korkean lämmönvastuksen takia betonin ja polyuretaanieristeen rajapinnassa on lähes sama lämpötila, kuin sisäil-

massa. Tästä johtuen tähän rajapintaan ei pitäisi tiivistyä kosteutta. VTT:n tutkimusselostuksen (2009) mukaan Polyuretaanilevyillä eristetty betoniseinä pystyy kuivumaan ja sitä on turvallista käyttää. Käytettäessä diffuusiotiiviillä laminaatilla päällystettyä polyuretaanieristettä rakennuskosteus kuivuu sisälle päin, mikä pitää ottaa huomioon sisäpuolisessa vesihöyrynläpäisevyydessä. Tuloksien perusteella myöskään homehtumista ei tapahdu tuulensuojassa.

Polyuretaanieristelevy on jäykkä ja pinnaltaan tasainen. Mikäli eristeen takana oleva betoniseinä ei ole täysin tasainen, on mahdollisuus, että seinän ja eristeen väliin ja konvektion mahdollistama ilmarako. Konvektion vaikutuksesta eristeen taakse voi kulkeutua vesihöyryä, mikä voi myöhemmin tiivistyä. Eristelevyn asennuksessa on erityisen tärkeää, että eristelevyt asennetaan tiiviisti betonia vasten, jottei eristelevyn ja betonin väliin pääse kulkeutumaan vettä. Levyjen saumat tulee vaahdottaa ja ilman pääsy betonin ja eristelevyn väliin estää. Asennuksessa on kiinnitettävä myös huomiota siihen, ettei seinään asenneta kastuneita eristelevyjä.

## 4.5 Lämmöneristys

Rakentamismääräyskokoelmassa C3 Rakennusten lämmöneristys määrätään uusien rakennusten eri rakennusosille tietyt  $U$  -arvovaatimukset. Ulkoseinille  $U$  -arvovaatimuksena on  $0,17 \text{ W/m}^2\text{K}$  (RakMk D3, 2012).

### 4.5.1 Lämmönläpäisykerroin

Lämmönläpäisykerroin  $U$  [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ] kertoo rakenteen läpi pääsevän tehon neliömetrin alueella, kun tilojen välinen lämpötilaero on yksi aste. Lämmönläpäisykerroin on koko rakenteen lämmönvastuksen käänteisarvo, se lasketaan kaavalla (8). Tässä työssä tutkittujen seinärakenteiden lämmönläpäisykerroin on laskettu liitteessä 1.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad (8)$$

jossa  $R_T$  [ $\text{m}^2\text{K/W}$ ] on rakenteen yhteenlaskettu lämmönvastus. Rakenteen lämmönvastus  $R_T$  saadaan kaavasta (9).

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots R_n + R_{se} \quad (9)$$

jossa  $R_{si}$  on rakenteen sisäpuolinen lämmönvastus vaakasuoraan,  $R_1, R_2 \dots R_n$  ovat epähomogeenisten ainekerroksien lämmönvastuksia ja  $R_{se}$  rakenteen ulkopuolinen lämmönvastus. Vaakasuoralla sisäpuoliselle lämmönvastukselle  $R_{si}$  käytetään arvoa  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Hyvin tuulettuville rakenteille ulkopuoliselle lämmönvastukselle käytetään samaa arvoa kuin sisäpuoliselle lämmönvastukselle. Hyvin tuulettuvalla rakenteella tarkoitetaan rakennetta, jossa tuulettuvaan tilaan johtavien aukkojen yhteenlaskettu koko on suurempi kuin  $15 \text{ cm}^2/\text{m}$  pysty- tai vaakarakenteissa. (RakMk C4, 2003).

### 4.5.2 Kylmäsiilat

Jos U -arvolaskelmilla halutaan osoittaa rakenteen U -arvon vaatimustenmukaisuus, otetaan kylmäsiilat mukaan laskelmiin niistä aiheuttavien vaikutusten verran. Yksittäisiä kylmäsiiloja ei rakenteissa tarvitse ottaa huomioon, mutta Stofix -kiinnitysjärjestelmässä teräksisiä kiinnikkeitä on 2,38 kpl/m<sup>2</sup>, jolloin niiden vaikutus pitää ottaa huomioon. Yhdessä ne muodostavat kylmäsiiloja lämmöneristysten lävitse betoniseinään. (RakMK C4, 2003). Stofix:in omissa laskelmissa kiinnitysjärjestelmän vaikutus U-arvoon kylmäsiilojen muodossa on 0,005 W/m<sup>2</sup>K. Tämä arvo on otettu mukaan U-arvolaskelmissa.

### 4.5.3 Tuulensuoja

Tuulensuojan tehtävänä on suojata eristystä tuulelta ja ilmavirtauksilta. Se estää pakotettua konvektiota eristeissä ja haitallisia ilmavirtauksia. Mikäli rakenteessa ei ole muuta tuulensuojana toimivaa kerrosta ja eristeiden lämmönjohtavuuden soveltaminen sitä edellyttää, tulee rakenne suojata erillisellä tuulensuojalla. Tuulensuojana käytettävän rakenteen ilmanläpäisevyydelle on asetettu enimmäisarvo, jonka tuulensuojan pitää täyttää. Tuulensuojan ilmanläpäisykertoimen pitää olla alle  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ . Tuulensuoja ei saa olla rakoja tai reikiä ja sen tulee peittää eristyskerros kauttaaltaan. (RakMK C4, 2003).

Mikäli eriste on huokoista ja sen ilmanläpäisevyys on suuri, vaikuttaa se lämmöneristykseen eristävyyteen. Ilmanläpäisevyys otetaan huomioon lämmöneristävytydessä korjaustekijän  $\Delta U_a$  [W/m<sup>2</sup>K] avulla. Korjaustekijä voidaan laskea kaavalla (11) (RIL 224-2004).

$$\Delta U_a = \Delta U_a'' \cdot \left( \frac{R_l}{R_T} \right)^2 \quad (11)$$

jossa  $\Delta U_a''$  on ilmanpitävyydestä riippuva kerroin,  $R_l$  [m<sup>2</sup>K/W] on ilmaa läpäisevän lämmöneristekerroksen lämmönvastus ja  $R_T$  [m<sup>2</sup>K/W] on koko rakennusosan lämmönvastus. Kerroin  $\Delta U_a''$  riippuu eristävän kerroksen ilmanläpäisevyydestä, suojaustavasta ja korjaustasosta taulukon 7 mukaan.

**Taulukko 7.** Ilmanläpäisevyydestä riippuva korjauskerroin  $\Delta U_a''$  pystysuoralle lämmöneristykselle (RIL 225-2004)

Lämmöneristykseen suojautapa	Lämmöneristeen		Korjauskerroin $\Delta U_a''$ [W/m <sup>2</sup> K]		
	Ilmanläpäisevyys L [m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·s·Pa]	Ilmavirtauksen ominaisvastus $R_a$ [kPa·s/m <sup>2</sup> ]	Korjaustaso 0	Korjaustaso 1	Korjaustaso 2
a	$30 \cdot 10^{-6}$	33	0	0	0
	$50 \cdot 10^{-6}$	20	0	0	0,005
	$100 \cdot 10^{-6}$	10	0	0,005	0,01
	$200 \cdot 10^{-6}$	5	0,005	0,01	0,015
	$400 \cdot 10^{-6}$	2,5	0,01	0,015	0,02

	$800 \cdot 10^{-6}$	1,25	0,015	0,025	0,05
b	$30 \cdot 10^{-6}$	33	0	0	0
	$50 \cdot 10^{-6}$	20	0,005	0,005	0,01
	$100 \cdot 10^{-6}$	10	0,005	0,01	0,015
	$200 \cdot 10^{-6}$	5	0,015	0,02	0,03
	$400 \cdot 10^{-6}$	2,5	0,03	0,045	0,06
	$800 \cdot 10^{-6}$	1,25	0,06	0,09	0,12

Lämmöneristysten suojaustavalla tarkoitetaan, miten laskettava eriste on suojattu. Suojaustapa a tarkoittaa, että laskettava eriste on ilmansulun ja tuulensuojan välissä. Ilmansulun enimmäisarvo saa olla  $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$  ja tuulensuojan enimmäisarvo  $10 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$ . Suojaustapa b tarkoittaa rakennetta, jossa eristeen toisella puolella on ilmansulku ja eristeen kylmä puoli on ilmapäliä tai -tilaa vasten. Ilmansulun ilmanläpäisyarvolle on sama vaatimus kuin suojaustavassa a. Korjaustaso kertoo kuinka hyvin eristeet ovat asennettu. Korjaustavan 0 mukainen eristys ei sisällä ilmarakoja, vaan eristeet ovat asennettu tarkasti niin, ettei eristeiden ja sitä rajoittavien reunojen väliin ole jäänyt ilmarakoja. Esimerkkinä PUR/PIR -eristetyt seinät. Korjaustavan 1 mukainen seinä sisältää vähäisiä epäideaalisuuksia. Esimerkkinä mineraalivillalla eristetyt seinät, jossa eristeet ovat asennettu puskuun, mutta saumoja ei ole mitenkään erityisesti tilkitty. Korjaustaso 2 sisältää epäideaalisuuksia. Niitä ovat esimerkiksi tiilimuurauksen yhteydessä tulleet laastipurseet, jotka painavat lämmöneristettä irti sisäpuolen rakenteista. Eristeet eivät ole asennettu tiiviisti, vaan eristeen takana ja ympärillä voi olla ilmalle helppokulkuisempia rakoja kuin lämmöneriste. (RIL 225-2004).

Polyuretaanilevyillä eristetty seinä kuuluu korjaustasoon 0. Se tarkoittaa, että ulkopinnan materiaalin huokoisuudella ei ole niin suurta vaikutusta rakenteen eristävyys. Esimerkkirakenteena voidaan laskea betoniseinä, jossa on eristeenä 100 mm PIR -eristettä ja 50 mm kivivillaa. Rakenteen U -arvo on  $0,16 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Rakenteen kokonaislämmönvastus  $R_T$  on  $6,08 \text{ m}^2\text{K/W}$ , josta kivivillan lämmönvastus  $R_I$  on  $1,53 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Rakenteessa ei ole tuulensuojaa, joten rakenne kuuluu suojaustapaluokkaan b. Kivivillan ilmanläpäisykerroin on  $120 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$  (Paroc Oy, 2016). Taulukosta 4 voidaan lukea arvo ilmanläpäisevyydestä riippuvalle kertoimelle  $\Delta U_a''$ , joka saa arvon 0,015. Edellä mainituilla arvoilla voidaan laskea ilmaläpäisevyydestä johtuva korjaustekijä kaavalla 11. Korjaustekijäksi saadaan  $\Delta U_a = 0,000947 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Korjaustekijän arvo on pieni. Vaikutus on vähäinen rakenteen U-arvolaskennassa. PUR/PIR -levyillä eristetyssä rakenteessa PUR/PIR -levyillä on niin suuri osuus rakenteen lämmönvastuksesta, että rakenteen ulkopinnassa olevan materiaalin ilmanläpäisevyyden vaikutus on vähäinen.



#### 4.5.4 Seinärakenteen lämpötekkinen toiminta

Seinärakenteen lämpöjakaumalla on suuri merkitys myös kosteusteknisestä näkökulmasta. Ilma pystyy sitomaan kosteutta sitä enemmän mitä lämpimämpää se on. Tutkittaessa rakenteen kosteusteknistä toimintaa tutkitaan myös rakenteen lämpöjakauma. Lämpöjakauman ja kosteusvirran avulla voidaan laskea rakenteen mahdolliset kastepisteet.

Kuten kosteus, myös lämpöenergia siirtyy korkeammasta lämpötilasta matalampaan. Lämpö siirtyy kiinteän aineen läpi värähtelemällä. Kaasussa molekyylit värähtelevät vaihtamatta paikkaa. Polyuretaanieristeen johtavuus perustuu kaasujen huonoon lämmönjohtavuuteen. Kun rakenteen ympärillä valitsee tietyt olosuhteet, jotka tiedetään, voidaan rakenteen eri osien lämpötilat laskea kaavalla 12.

$$T_x = T_i - \frac{\sum_{n=1}^x R_n}{R_{tot}} (T_i - T_e) \quad (12)$$

jossa  $T_x$  [°C] on rakenteen lämpötila kohdassa  $x$ ,  $T_i$  [°C] sisäilman lämpötila,  $T_e$  [°C] ulkoilman lämpötila,  $\sum R_n$  [m²K/W] lämmönvastusten summa sisäilmasta kohtaan  $x$  ja  $R_{tot}$  [m²K/W] koko seinärakenteen yhteenlaskettu lämmönvastus. Lämmönvastus  $R$  voidaan laskea kaavalla 13.

$$R = d \cdot \lambda \quad (13)$$

jossa  $d$  [m] on rakenneosan paksuus ja  $\lambda$  [mK/W] rakenneosan lämmönvastus. (RIL 255-2010).

Seinärakenteen kaikilla osilla on lämmönvastus. Rakenteen pinnoille lasketaan myös lämmönvastus. Se kuvaa rakenteen pinnassa olevaa ohutta ja hitaasti liikkuvaa ilmakerrosta. Sisäpuoliselle pintavastukselle  $R_{si}$  vaakasuorilla pinnoilla käytetään arvoa 0,13 m²K/W. Ulkopuoliselle ilmvälin lämmönvastukselle  $R_{se}$  on tilanteesta riippuen useita eri arvoja (taulukko 8). Perusarvona ulkopuoliselle pintavastukselle käytetään vaakasuorilla pinnoilla arvoa 0,4 m²K/W.

**Taulukko 8.** Ulkopuolisen pintavastuksen lämmönvastuksia tuulettumattomassa ilmaraossa  
(RakMk C4, 2003)

Rajoittavien pintojen emissiviteetti	Ilmaraon paksuus $d_g$ [mm]	Lämmönvastus $R_g$ [m²K/W]		
		Lämpövirran suunta		
		vaaka-suora	ylös-päin	alas-päin
Yleinen tapaus: ei heijastavia pintoja $\epsilon > 0,8$	5	0,11	0,11	0,11
	10	0,15	0,15	0,15
	20	0,17	0,16	0,18
	50–100	0,18	0,16	0,21
Toinen pinta heijastava $\epsilon < 0,2$	5	0,17	0,17	0,17
	10	0,27	0,23	0,29
	20	0,36	0,25	0,43
	50–100	0,34	0,27	0,61

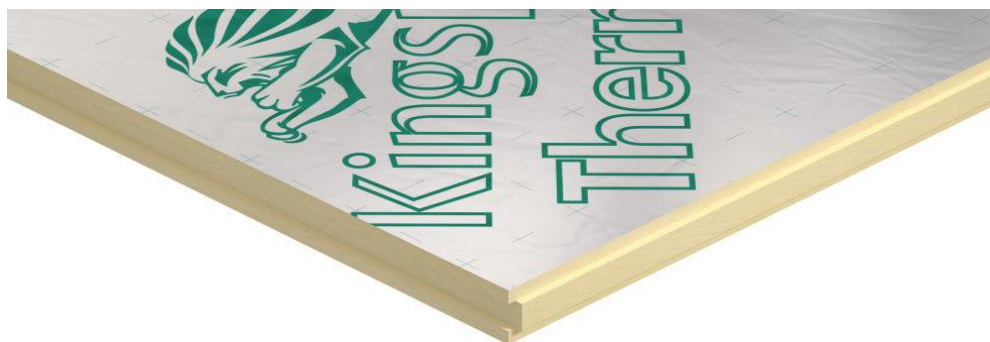
Hyvin tuulettuvassa rakenteessa, jossa ilmarakojen määrä on suurempi kuin 15 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>, käytetään pintavastukselle samaa arvoa kuin sisäpuoliselle pintavastukselle  $R_{si} = 0,13$  m<sup>2</sup>K/W. Seinärakenteiden lämpöjakaumat on esitetty liitteessä 3.

## 5. UUDEN KIINNIKKEEN SUUNNITTELU

### 5.1 Käytettävät materiaalit

#### 5.1.1 PUR/PIR -eriste

PUR/PIR -eristeillä on pehmeitä eristeitä paremmat lämmöneristysarvot ( $0,022 - 0,027 \text{ W/mK}$ , vertaa kivivilla  $0,036 \text{ W/mK}$ ). Niiden lämmöneristyskyky perustuu sen umpisolurakenteessa olevaan kaasuseoksen lämmöneristyskykyyn. Polyuretaanisolumuovi (PUR) koostuu polyolista, polymeerisestä difenyyylimetaanidi-isosyaniitista ja ponneaineesta. PIR -eristeessä on polyuretaanin lisäksi polyisosyanyraattia. Valmistusprosessin aikana ponnekaasut jäävät umpinaisiin soluihin. Ponnekaasuina PUR/PIR -eristeissä käytetään hiilivetyjä, kuten pentaani ja hiilidioksidi tai eri ponneaineiden sekoituksia. Ponneaineet ovat ympäristölle vaarattomia. Raaka-aineiden sekoittuessa tapahtuu kemiallinen reaktio, jonka seurauksena aineseos turpoaa. Väriltään polyuretaanisolumuovi on vaaleaa (kuva 19), mutta eristelevyjä voidaan myös värjätä. UV -säteily värjää polyuretaanin kellertäväksi. (RIL 255, 2014).



**Kuva 19.** Diffuusiotiiviillä alumiinilaminaatilla pinnoitettu Kingspan Therma TW50 -eriste (PIR) (Kingspan, 2016)

Korkea eristyskyky PUR/PIR -eristeillä perustuu umpisolurakenteeseen ja soluissa olevan kaasun tai kaasuseoksen lämmöneristyskykyyn, joka on ilman lämmönjohtavuutta pienempi. Ilman lämmönjohtavuus on luokkaa  $\lambda=0,024-0,026 \text{ W/mK}$ , kun pentaanin ja sen vakioisomeerien (iso- tai syklopentaani) sekoituksen lämmönjohtavuus on  $0,012 - 0,013 \text{ W/mK}$  välillä (PU-Nordic, 2016). Eristyskyky perustuu myös eristeen tiheyteen eli solujen määrään. PUR/PIR -eristeiden tiheys vaihtelee  $30 - 100 \text{ kg/m}^3$  välillä. Lämmöneristeiden, jota käytetään rakennuksissa, tiheys vaihtelee  $30 - 45 \text{ kg/m}^3$  välillä normaalisti. Tiheämmässä aineessa solujen määrä on pienempi ja se vaikuttaa hieman lämmönjohtavuuteen. Tiheys ja lämmönjohtavuus eivät muutu samassa suhteessa, vaan tiheyden muuttuessa lämmönjohtavuuden arvo vaihtelee vain vähän (PU-Nordic, 2016).

Diffuusion vaikutuksesta ilma diffusoituu hitaasti soluihin, mikä vaikuttaa eristeen lämmöneristyskykyyn. Kolmen vuoden aikana diffuusio tasaantuu, jonka jälkeen se on erittäin vähäistä. Valmistajien ilmoittamissa lämmöneristysarvoissa ilman diffuusio ja sen aiheuttama lämmönjohtavuusarvon heikkeneminen on huomioitu. Diffuusiota voidaan hidastaa eristeessä diffuusiotiiviillä laminaateilla. Edellä mainituista syistä johtuen diffuusiotiiviillä laminaatilla pinnoitetuilla eristeillä on paremmat lämmöneristysarvot kuin diffuusioavomilla pinnoitteilla päällystetyillä eristeillä. Diffuusiotiiviillä laminaatilla pinnoitettujen PUR/PIR -eristeiden lämmönjohtavuus vaihtelee välillä 0,022 – 0,023 W/mK ja diffuusioavomilla pinnoitteilla pinnoitettujen tai pinnoittamattomien lämmönjohtavuusarvot paksuudesta ja tuotteesta riippuen 0,024 – 0,027 W/mK. (RIL 255, 2014).

Täysin tiiviin solurakenteen johdosta PUR/PIR -eristeet ovat ilmatiiviitä, vesihöyrynläpäisevyys on pieni ja eivätkä eristeet ime merkittävästi hygroskooppisesti kosteutta. Pienen vesihöyrynläpäisyn ansiosta PUR/PIR -eristeitä voidaan käyttää myös höyrynsulkuna. Pinnoittamattomien PUR/PIR -eristeiden vesihöyrynläpäisevyys  $\delta_v$  vaihtelee välillä  $0,01 - 0,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Vesihöyrynläpäisevyyteen vaikuttavat vaahdon koostumus ja eristeen valmistus. Pinnoitettujen PUR/PIR -eristeiden vesihöyrynläpäisevyys riippuu pinnoitusmateriaalin ominaisuuksista. Pinnoittamisessa käytetyt laminaatit voidaan jakaa diffuusiotiiviisiin laminaatteihin ja diffuusioavomiin laminaatteihin. Diffuusioavomilla laminaateilla päällystettyjen eristeiden vesihöyrynläpäisevyys on samaa luokkaa kuin päällystämättömien eristeiden. Diffuusiotiiviillä laminaatilla päällystetyn PUR/PIR -eristelevyn vesihöyrynläpäisevyys  $\delta_v$  vaihtelee välillä  $0,005 - 0,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . Vesihöyrynläpäisevyyden arvo riippuu paljon eristeen paksuudesta. Paksuilla eristelevyillä on suhteessa enemmän paremmin vesihöyrynläpäisevää vaahtoydintä, mikä lisää vesihöyrynläpäisyyttä. (RIL 255, 2014).

### 5.1.2 Teräslaatu

Teräslaatuuna kiinnikkeessä käytetään samaa materiaali kuin nykyisen järjestelmän seinäkiinnikkeissä. Materiaali on kuumasinkittyä terästä, jossa sinkkikerroksen vahvuus on  $275 \text{ g/m}^2$ . Käytettäessä saamaa sinkkimäärää ja teräslaatu voidaan varmistua kiinnikkeen käyttöiästä, jonka VTT (2009b) on määrittänyt nykyiselle Stofix -järjestelmälle.

### 5.1.3 Kiinnitysalusta

Tässä työssä on tutkittu kiinnikkeen asentamista paksuun betoniseinään. Kiinnikkeen asentamien on kuitenkin mahdollista myös muihin koviin pintoihin kuten kevytbetoniin, kevytsorabetoniin tai tiilen. Tiheydeltään ja lujuuksiltaan nämä materiaalit ovat kuitenkin betonia kevyempiä ja heikompia. Tällöin ei myöskään sama kiinnitysruuvi sovellu näihin materiaaleihin. Myös seinärakenteen paksuus voi olla ohuempi, jolloin kiinnitysruihin vetolujuus pitää olla normaalia betoniruuviä isompi.

Kun vanhaan seinärakenteeseen kiinnitetään järjestelmää, pitää kiinnitysruuvi testata aina tapauskohtaisesti. Seinämateriaaleissa voi olla myös paljon laatupoikkeamia, joten varmuutta kiinnitysruuvien vetolujuudessa pitää olla. Ankkurointi tapa pitää myös erikseen suunnitella ja mitoittaa tapauskohtaisesti

Jos seinäpinta on epätasainen pitää seinäala tasoittaa, ellei sitä saada muuten ilmatiiviiksi. Joka tapauksessa kiinnikkeiden paikat pitää olla tasaisia. Tarpeen vaatiessa kiinnikkeiden asennuskohdat suoritetaan riittävän lujalaatuisella betonilla.

## 5.2 Uuden kiinnikkeen hahmottelu

Kiinnitystä valittaessa täytyy ottaa huomioon myös viranomaismääräykset, kuten 1.7.2013 voimaan tullut CE-merkinnän käyttöönotto rakennukseen kiinteästi asennettavilla rakennustuotteilla ja -materiaaleilla (Ympäristöministeriö2012).

Uuden kiinnikkeen lähtökohtana on, että se korvaa nykyisen seinäkiinnikkeen. Sen pitää kestää sille kohdistuvat kuormat tutkituilla seinärakenteilla ja sen pitää olla yhteensopiva nykyisen järjestelmän kanssa. Haastavan suunnittelusta tekee se, että lähtökohtana asennustyölle on betoniseinä, joka on eristetty tiiviisti polyuretaanieristeillä. Vaihtoehtoja asennukseen on kaksi: joko asennettuun eristelevyyn tehdään reiät seinäkiinnikkeiden asentamista varten tai uusi kiinnike asennetaan suoraan eristeeseen lävitse. Asennustyötä lähdettiin miettimään työvaiheiden minimoimisen kautta ja sen johdosta jo asennetun eristeeseen leikkaaminen jäi pois vaihtoehdoista. Päätettiin suunnitella suoraan asennettaviksi eristelevyn lävitse.

Eristelevyn läpiasentaminen luo kiinnikkeelle vaatimuksia. Kiinnikkeen leikkaava pinta-ala ei voi olla liian suuri, jotta asennus eristeeseen läpi onnistuu riittävän helposti. Leikkaava pinta-ala on se pinta, joka asennetaan vasten betoniseinää. Pinta-alan tulee olla kuitenkin riittävän suuri kestääkseen siihen kohdistuvat voimat, mutta tarpeeksi pieni, jotta läpiasennus onnistuu. Kiinnikkeen pitää olla riittävän kapea tai matala. Tällöin myös kiinnikkeen seinään tukeutuva pinta ala jää pieneksi, mikä tarkoittaa suuria pistekuormia tiettyihin kohtiin kiinnikettä ja kantavaa rakennetta. Kiinnikkeen materiaalina käytetään kuitenkin terästä ja kiinnityspohja on materiaaaliltaan betonia. Molemmat materiaalit ovat erittäin kovia ja kestävät koviakin pistekuormia. Materiaalit myös puristuessaan muuttavat muotoaan eli plastisoituvat ja näin kuormat jakautuvat teoreettista tarkastelua isommalle alueelle.

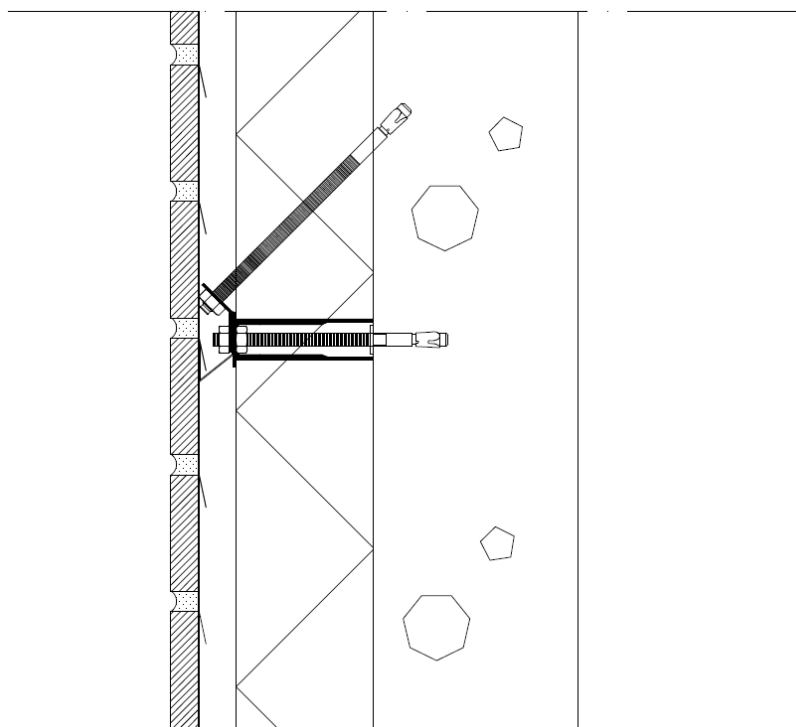
Alustavissa suunnittelupalavereissa Stofix:n teknisen johtajan Antti Juolan kanssa kiinnikettä mietittiin pistemäisesti tukeutuvana rakenteena, joka otti vastaan veto ja puristus kuormat. Pystykuormat suunniteltiin kannettavan 45 asteen kulmaan asennetuilla kiila-ankkureilla. Näissä ehdotelmassa yhteensopivuus nykyisen järjestelmän kanssa, sivuttaisten kuormien huomioon ottaminen ja kiinnikkeen säädettävyys nostivat kuitenkin esiin ongelmia.

Kiinnikkeelle lisättiin vaatimuksena, että sen pitää pystyä kantamaan siihen kohdistuvat vertikaaliset ja horisontaaliset kuormat. Pistemäinen kiinnike ei sitä pysty tarpeeksi tehokkaasti tekemään. Tällöin kaikki rasitukset kohdistuisivat itse kiinnikkeen kiinnittävään ruuviin, eikä itse kiinnikkeeseen. Jotta pysty- ja vaakasuuntaiset kuormat voidaan ottaa vastaan kiinnikkeellä, pitää kiinnikkeen olla tarpeeksi leveä ja korkea, jotta se voi ottaa vastaan vaaka- ja pystysuuntaisista kuormista aiheutuvat momentit. Kiinnikkeen lävistävän pinnan pinta-alan pitää kuitenkin pysyä riittävän pienenä eristyslevyn läpiasentamisen vuoksi.

Seuraavissa luvuissa on esitetty kiinnikkeen luonnosteluvaiheissa hahmoteltuja kiinnikevaihtoehtoja, joista yksi valikoitui selkeästi jatkotarkastelua varten. Vaihtoehdot 1 – 4 ovat hahmoteltuja myös kronologisesti. Vaihtoehdoissa on huomattavissa kiinnikkeen kehittyminen suhteessa aikaisempiin ongelmiin.

### 5.2.1 Vaihtoehto 1

Ensimmäisen hahmotelman ideana oli putkimainen kiinnike (kuva 20).



**Kuva 20.** *Vaihtoehto 1, putkimainen kiinnike*

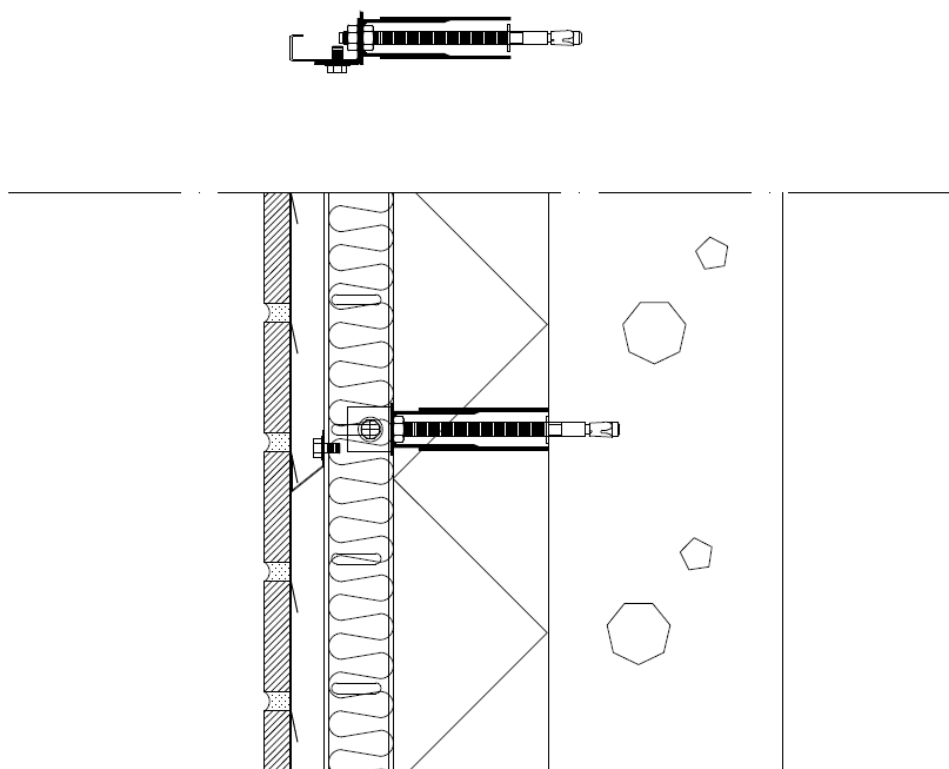
Pystykuormat otettiin vastaan 45 asteen kulmaan asennettavalla kiila-ankkurilla. Kiinnikkeen säätö tapahtuu kaksiosaisella putkella, jossa sisempi putki liukui vapaasti ulomman putken sisällä. Ongelmia kiinnikkeessä on:

- Kuormat siirtyvät kiinnikkeen sisällä pääasiassa kitkan avulla, mikä aiheuttaa suuria siirtymiä

- Ei ole yhteensopiva jatkokiinnikkeiden kanssa
- Elementin asennus ei välttämättä mahdollista, koska vino kiila-ankkuri tulee niin lähelle rakenteen ulkopintaa
- Kiinnikkeen valmistus vaatii hitsaamista
- Kiinnike ottaa huonosti vastaan vaakasuuntaisia voimia
- Säädön puuttuminen sekä vaaka-, sivu- ja pystysuunnassa

## 5.2.2 Vaihtoehto 2

Toisena vaihtoehtona (kuva 21) on päivitetty versio edellisestä. Vaihtoehdosta 1 eroten tässä kiinnikkeessä on lisänä yksi osa, joka mahdollistaa kiinnikkeen yhteensopivuuden eristyskiskoon. Pystysuuntaiset kuormat otetaan vastaan myös vinoon asennettavilla kiila-ankkureilla. Kiila-ankkurit eivät näy kuvassa.



**Kuva 21.** *Vaihtoehto 2, putkimainen kiinnike*

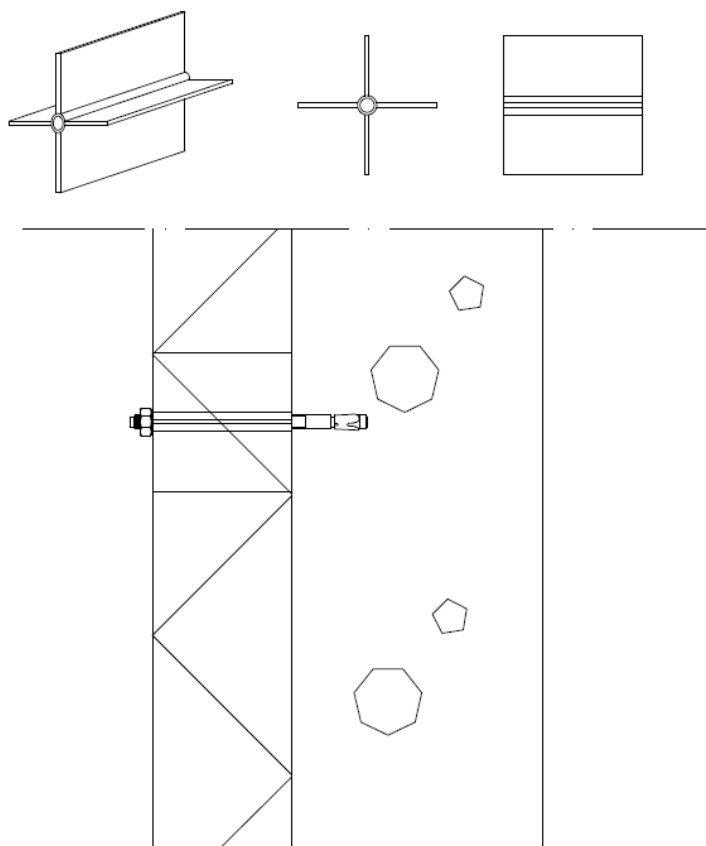
Vaihtoehdossa 2 on kuitenkin vielä paljon samoja ongelmia kuin vaihtoehdossa 1. Ongelmia:

- Kuormat siirtyvät kiinnikkeen sisällä pääasiassa kitkan avulla, mikä aiheuttaa suuria siirtymiä
- Ei ole yhteensopiva jatkokiinnikkeen kanssa
- Kiinnikkeen valmistus vaatii hitsaamista
- Kiinnike ottaa huonosti vastaan vaakasuuntaisia voimia

- Säädön puuttuminen pysty- ja sivusuunnassa

### 5.2.3 Vaihtoehto 3

Kolmantena vaihtoehtona (kuva 22) on ehdotus, joka pystyy ottamaan vastaan pysty- ja vaakasuuntaisia kuormia momenttivarren avulla, mikäli kiinnittävä ruuvi kestää momentista aiheutuvan vedon. Kiinnikkeen sisäiset kuormat voidaan laskea. Ongelmia kiinnikkeessä kuitenkin on, joiden vuoksi vaihtoehto 3 ei toimi käytännössä.



**Kuva 22.** *Vaihtoehto 3, ristikiinnike.*

Esiin tulleita ongelmia vaihtoehdossa 3:

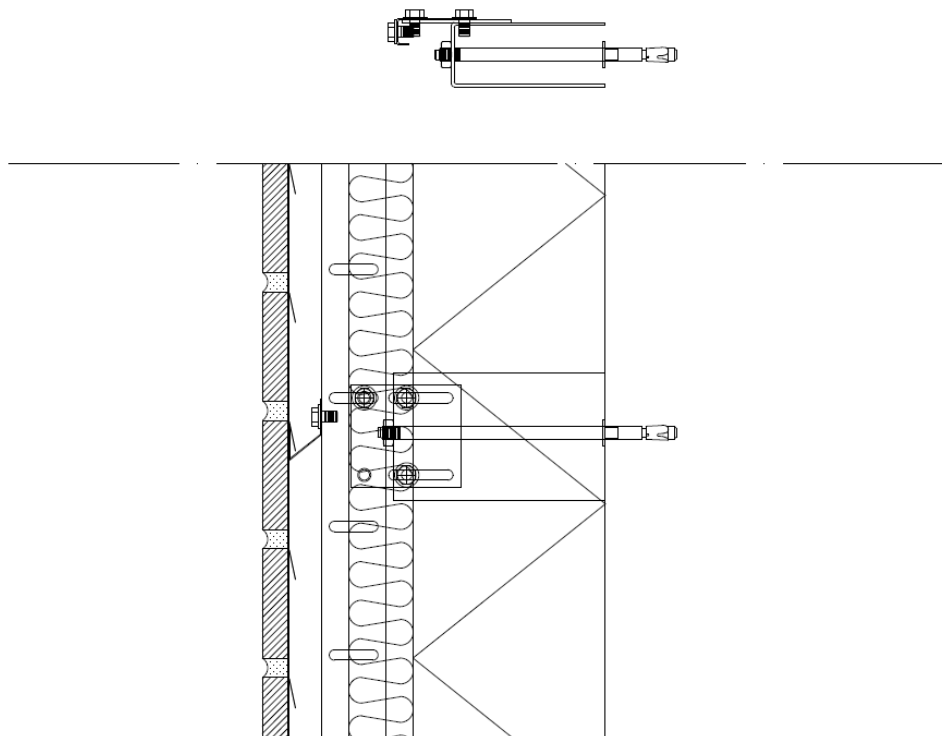
- Ei ole yhteensopiva muun järjestelmän kanssa
- Kiinnikkeen valmistus vaatii hitsaamista
- Kiinnikkeen valmistusongelmat (monta osaa)
- Säädön puuttuminen pysty-, vaaka- ja sivusuunnassa

### 5.2.4 Vaihtoehto 4

Vaihtoehto 4 (kuva 23) on taas edelleen päivitetty vaihtoehdosta 3. Kiinnikkeen ulkomuotoa on muutettu niin, että sen valmistaminen onnistuu yhdestä kappaleesta ja että se



on yhteensopiva muun järjestelmän kanssa. Lisäksi kiinnikkeen asentaminen eristeen läpi on helppoa. Tämä vaihtoehto valittiin jatkolaskelmia ja testausta varten.



**Kuva 23.** *Vaihtoehto 4, U -kiinnike*

Kuten aikaisemmissakin vaihtoehtoissa, myös tässä on vielä yksi ongelma:

- Vaakasuuntainen säätö puuttuu

Vaakasuuntainen säätö ei kuitenkaan ole välttämätön kiinnitysjärjestelmässä. Vaakasuuntainen säätö voidaan korvata riittävän tarkalla asennuksella. Kiinnikkeen asennuskohdassa voi olla muutamien millien heittoa, jotka eivät vaikuta järjestelmän asennukseen tai kestävyYTEEN.

### 5.3 Valitun kiinnikkeen toimivuuden analyysi

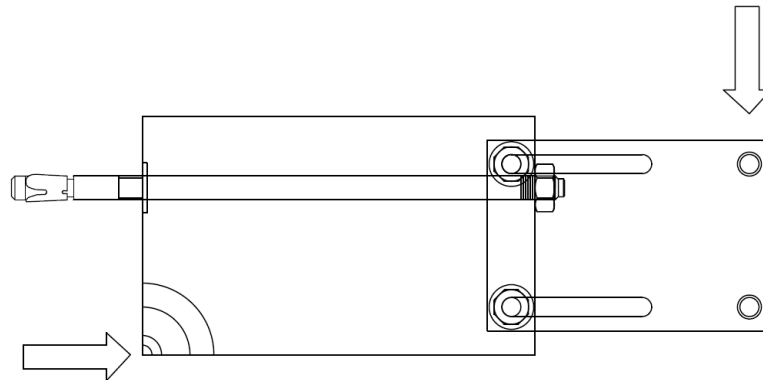
Kuvassa 21 esitetty kiinnike on ensimmäinen versio ideoidusta kiinnikkeestä. Ensimmäisiä huomioita kiinnikkeen toiminnasta:

1. Pystykuorma aiheuttaa leikkausvoimaa ja momenttia
  - a. Ruuviin vetoa
  - b. Kiinnikkeen alareunoihin puristusta
  - c. Tuulenpaine lisää puristusta kiinnikkeen alareunassa
2. Kiinnikkeen liitos betoniin ja liitosalueiden jännitykset
3. Kiinnikkeen seinämien nurjahtaminen
4. Epäkeskoinen jatkokiinnikkeen kiinnityskohta

## 5. Asennus eristeen läpi

Ensimmäistä ongelmaa voidaan pienentää siirtämällä kiinnitysruuvien kohta mahdollisimman ylös kiinnikkeessä, jolloin pystykuorman momentista ruuviin aiheutuva vetokuorma pienenee. Kiinnikkeeseen kohdistuvat kuormat eivät kuitenkaan ole suuria. Pystykuorma rakenteen omasta painosta on  $432,6 \text{ N/m}^2$ , mutta epäsuotuisien momenttivarsien vaikutuksesta kiinnittävään ruuviin kohdistuvat voimat voivat kasvaa hyvinkin suuriksi. Alustavasti uuden kiinnikkeen kanssa on suunniteltu käytettävän maksimissaan 285mm eristepaksuutta. Tällöin momenttivarreksi tulee 330 mm. Yhdessä pystykuorman kanssa se aiheuttaa kiinnikkeeseen ja seinän liitoskohtaan noin 60 Nm momentin. Tällöin 3 cm muutos ylöspäin kiinnitysruuvien kohdassa vähentää vetokuormaa noin 450 N. Tästä syystä on erityisen tärkeää, että kiinnike asennetaan seinään oikein päin. Jos kiinnike asennetaan väärinpäin, sen kestävyys heikkenee merkittävästi. Väärinpäin asennettaessa ruuviin vetokuormaa aiheuttava momenttivarsi lyhenee huomattavasti ja ruuviin aiheutuvat vetokuormat voivat kasvaa kolminkertaisiksi. Tarkempi tarkastelu kiinnikkeeseen kohdistuvista kuormista on esitetty luvussa 6.2.1.

Pystykuorma painaa kiinnikkeen etureunaa alaspäin, jolloin kiinnikkeen alareunaan kiinnikkeen ja seinän liitoskohtaan kohdistuu suuria kuormia (kuva 24). Materiaalien myötäessä kuormat kuitenkin jakautuvat suuremmille alueille ja nurkkiin kohdistuvat suuret jännitykset jakautuvat.



**Kuva 24.** Kiinnikkeen alanurkkaan kohdistuva kuorma

Betonin halkaisukapasiteettia voidaan selvittää kaavalla (14) (RIL 131-2004).

$$\frac{1,2F_d}{A_{c0}} \leq f_{cd} \quad (14)$$

jossa  $F_d$  [N] on painava voima ja  $A_{c0}$  [m<sup>2</sup>] betonia kuormittavan kappaleen pinta-ala. Mikäli yhtälö pitää paikkansa, ei katsota halkaisukapasiteettia vielä saavutettavan

Kiinnikkeen nurjahdus on ajankohtainen tuulenpaineesta aiheutuvan kuorman vaikutuksen alla, jolloin tuulenpaine työntää kiinnikettä kohti seinää. Rakennepaksuutena materi-

aalille on suunniteltu 2 mm. Materiaalina sama teräslaatu kuin nykyisen järjestelmän kiinnikkeissä. Kiinnikkeen ympärillä oleva eriste estää kiinnikkeen nurjahtamista. Samoin ruuvi estää myös sivuttaisia siirtymiä kiinnikkeessä. Myös kiinnittävän ruuvin kiristäminen voi aiheuttaa kiinnikkeen nurjahtamisen. Kiinnittävän ruuvin kiristysvoima pitää määritellä. Nurjahdusta ja sen aiheuttamia kuormia tutkitaan tarkemmin luvussa 6.2.1.

Epäkeskoinen kiinnityskohta voi aiheuttaa kiinnikkeen kiertymistä ruuvin ympäri. Kiinnikkeitä on asennettuna enemmän kuin yksi, jolloin kiertymät minimoituvat, kun kiinnikkeen sivut ottavat myös vastaan kiertymisestä aiheutuvia kuormia. Kiinnikkeen rasittavaa kuormaa voidaan miettiä sitä suoraan alapäin vetävänä voimana, koska kuorma jakaantuu myös ympärillä oleviin kiinnikkeisiin. Tällöin kuorma vaikuttaa suoraan alapäin sen liikumisen ollessa estetty muihin suuntiin. Jatkokiinnikkeen jäykkä kiinnitys kiinnikkeeseen estää kappaleen kiertymisen.

Eristelevyn läpiasennuksessa ongelmia voi syntyä eristeen toiminnasta. Vaikka läpi työnnettävä kiinnike on pinta-alaltaan pieni, voi se työntää edellään eristettä, jolloin se pakkaantuu. Pakkaantuessaan läpityöntävän voiman pitää kasvaa, koska eristepaakut ovat pinta-alaltaan isompia ja näin leikkaava pinta-ala myös kasvaa. Hooken lain mukaan pinta-alan kasvaessa myös kuorma kasvaa. Läpiasentamiseen tarvitaan todennäköisesti erillinen työkalu ruuvivääntimen ja poran lisäksi. Kiinnikkeen ja betonin väliin ei saa jäädä eristettä. Ajan myötä eriste viruu, joka johtaa kiinnikkeen kiristyksen löystymiseen. Kiinnike pitää pystyä asentamaan kiinni betoniseinään.

## 6. KIINNIKKEEN TESTAUS

### 6.1 PUR/PIR -eristeen läpäisy

Uusi kiinnike on suunniteltu asennettavan ennakkoon asennetun kovan PUR/PIR -eristeen läpi. Polyuretaaniset levyt ovat materiaaliltaan tiiviitä, mutta niiden leikkauslujuus on varsin alhainen. Standardin EN 12090 mukaan laskettuna PUR/PIR -eristeiden leikkauslujuus on välillä 120-450 kPa tiheydestä riippuen (PU-Nordic 2016).

Kiinnikkeen ainevahvuus on 2 mm ja korkeus 100 mm. Tällöin läpi työnnettävän pinnan pinta-ala on kiinnikkeellä 400 mm<sup>2</sup>. Jos PUR/PIR -eristeen leikkauslujuus on 200 kPa (=0,2 N/mm<sup>2</sup>) vaaditaan 400mm<sup>2</sup> kappaleen eristeen läpityöntämiseen 400 mm<sup>2</sup> x 0,2 N/mm<sup>2</sup> = 80 N voima. Kiinnikkeen läpityöntyvää pintaa voidaan pitää tasaisena. Tasainen pinta ei leikkaa eristettä niin tehokkaasti kuin teräväreunainen esine, jolloin kiinnikettä työntäessä eriste voi pakkaantua kiinnikkeen edellä. PUR/PIR -eristeen vetolujuus vaihtelee välillä 40 – 900 kPa tiheydestä riippuen (PU-Nordic 2016). Leikkauslujuuden ollessa pienempi kuin vetolujuus eristeen paakkuuntuminen on mahdollista. Tällöin leikkaava pinta-ala kasvaa, kun paakkuuntunut eriste jakaa työntävää voimaa myös sivuille päin eristeessä. Työntämiseen tarvittava voima voi nopeasti kolminkertaistua työntävän pinta-alan kasvaessa. Kolminkertaistuessaan työntävä voima olisi luokkaa 240 N. Eristeen työntyessä syvemmälle myös kitka eristeen ja kiinnikkeen pintojen välissä kasvaa, mikä kasvattaa työntävän voiman tarvetta.

Kiinnikkeen edellä työntämä eriste on ongelma jo työntövaiheessa, jolloin se lisää huomattavasti työntävän voiman tarvetta. Ongelmia tulee myös loppuvaiheessa, jolloin eristepaakku työntyy eristeen takana olevaa betoniseinää vasten. Riittävällä voimalla kiinnikkeellä voidaan työntää paakkuuntunut eriste katki. On myös riski, että paakkuuntunut eriste ei leikkaannu, vaan kiinnikkeen ja seinän väliin jää eristettä, joka estää kiinnikkeen suoraan asentamisen. Kiinnikkeen läpityöntämisen jälkeen kiinnike ruuvataan kiinni betoniseinään. Tässä vaiheessa on myös mahdollista painaa kiinnike paakkuuntuneen eristeen läpi. On myös mahdollisuus, että paakkuuntunut eriste vain pakkaantuu kiinnikkeen ja betonin väliin ja kiinnike jää asennuksen jälkeen vinoon. Ajan myötä eriste viruu kiinnikkeen ja betonin välissä, jolloin kiinnikkeen kiinnitys löystyy.

Eristeen paakkuuntumista voidaan välttää, jos ennen kiinnikkeen asennusta kiinnikkeelle leikataan/painetaan terävällä esineellä asennusaukot. Riittävän terävän esineen edessä PUR/PIR -eriste ei pysty paakkuuntumaan. Tehtäessä asennusaukkoa on tärkeää, että asennusaukko leikataan/painetaan betoniseinään asti, jolloin kiinnikkeen ja seinän väliin ei ole mahdollista paakkuuntua eristettä tai paakkuuntuminen on hyvin vähäistä. Alustavissa läpiasennuksissa testattiin yksi seinäisen kiinnikkeen läpityöntämistä. Kiinnikkeen

läpityöntävä voima kasvoi nopeasti eristeen paakkuuntuessa. Etukäteen tehtävät asennusreiät ovat välttämättömät kiinnikkeen asennuksessa.

## 6.2 Kiinnikkeen teoreettinen laskenta

Tässä luvussa tarkastellaan kiinnikkeen kuormituksia teoreettisen laskentamallin avulla ja Ansys 16.2 Academic FEM -pohjaisella laskentatyökalulla. Ansyksen opiskelijaversiossa on tiettyjä rajoituksia täysversioon nähden. Tarkasteltava kappale on kuitenkin pieni, joten rajoituksista ei ole mitään haittaa tässä työssä. Luvussa 6.3 on esitetty kiinnikkeen konkreettinen testaus ja niiden tulokset.

### 6.2.1 Kiinnikkeen teoreettinen laskentamalli ja ruuvien vetolujuus

Kiinnikkeelle lasketaan kolme eri kuormitustapausta luvussa 4.1 laskettujen kuormien mukaan. Kiinnikkeeseen vaikuttaa kolme kuormaa.

1. Oma paino  $g_{\text{jär}} = 432,6 \text{ N}$
2. Tuulen imu  $W_i = -964,6 \text{ N/m}^2$
3. Tuulen paine  $W_p = 689 \text{ N/m}^2$

Standardin SFS-EN 1990:2002 mukaan epäedullisin kuormitusyhdistelmä lasketaan kaavalla 15.

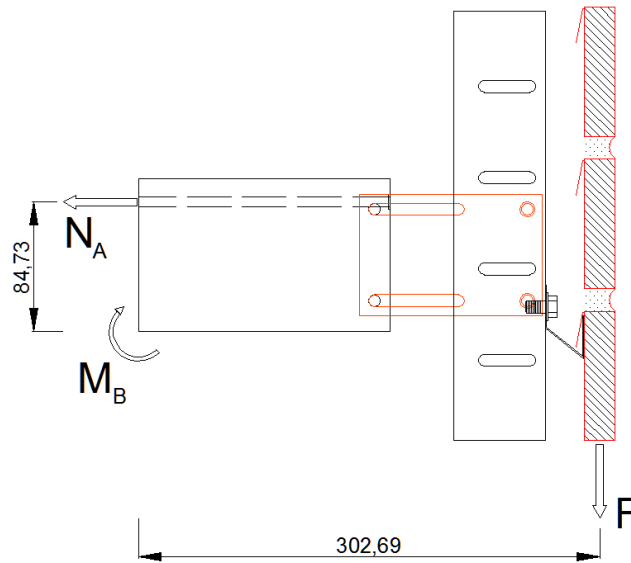
$$1,15K_{FI} \sum_{j \geq 1} G_{k,j} + 1,5K_{FI} Q_{k,1} + 1,5K_{FI} \sum_{i > 1} \Psi_{0,i} \cdot Q_{k,i} \quad (15)$$

jossa  $K_{FI}$  [kerroin] on seuraamusluokasta johtuva kuormakerroin. Asuinkerrostaloille käytetään seuraamusluokkaa CC2. Sitä seuraa myös luotettavuusluokka RC2, jolloin  $K_{FI} = 1,0$ .  $G_{k,j}$  ovat epäedulliset pysyvät kuormat,  $Q_{k,1}$  on määräävä muuttuva kuorma,  $\Psi_{0,1}$  muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ja  $Q_{k,i}$  muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo. Ratkaistaan kaavalla 15 kuormien mitoitusarvot taulukokkoon 9.

**Taulukko 9.** Kuormien mitoitusarvot

Kuormitus	Kuorma [N/m <sup>2</sup> ]	Kiinnikkeen ala [m <sup>2</sup> ]	Varmuuskerroin	Kuormitus / Kiinnike [N]
Omapaino $g_{\text{jär}}$	432,6	0,42	1,15	<b>208,9 (alaspäin)</b>
Tuulen imu $W_i$	-964,6	0,42	1,5	<b>-607,7 (ulospäin seinästä)</b>
Tuulen paine $W_p$	689	0,42	1,5	<b>434,1 (seinään päin)</b>

Kiinnikkeen yksinkertaistetun laskentamallin lähtökohtana on, että kiinnikkeen kiertyminen on estetty. Tällöin kiinnikkeen teoreettinen laskentamalli voidaan esittää kaksiulotteisena. Kiinnikkeen teoreettinen laskentamalli on esitetty kuvassa 25.



**Kuva 25.** Kiinnikkeen laskentamalli

Kiinnikettä kuormittaa etureunassa suoraan alaspäin kuorma  $F$  [N]. Kuorma  $F$  on tiilielementeistä ja järjestelmästä aiheutuva kuorma. Silloin  $F = 208,9$  N.  $N_A$  [N] on ruuviin kohdistuva vetovoima ja  $M_B$  [Nm] on kiinnikkeen alanurkkaan syntyvä momentti. Kuorman  $F$  momenttivarreksi  $x_1$  tulee 302,69 mm. Momentti  $M_B$  voidaan laskea kaavalla (16).

$$M_B = Fx_1 \quad (16)$$

Kun  $F = 208,9$  N ja  $x_1 = 0,30269$  m, saadaan momentiksi  $M_B = 63,23$  Nm. Momentti  $M_B$  vaikuttaa ruuviin aiheuttaen siihen vetoa. Vaikka kiinnityspiste on kiinnikkeen ulkopinnassa, voidaan olettaa kiinnikkeen siirtävän kuorman kiinnikkeen takaosasta kohtisuoraan etuseinämään ja sitä kautta ruuvin kantaan. Tällöin ruuviin tuleva vetovoima voidaan laskea kaavalla (17).

$$N_A = \frac{M_B}{x_2} \quad (17)$$

jossa  $x_2$  on ruuvin kiinnityskohdan kohtisuora etäisyys momenttipisteeseen pystysuunnassa. Tällöin  $x_2 = 0,08473$  m. Kaavasta (17) saadaan tällöin ruuviin kohdistuva vetovoima saa arvon  $N_A = 758,05$  N.

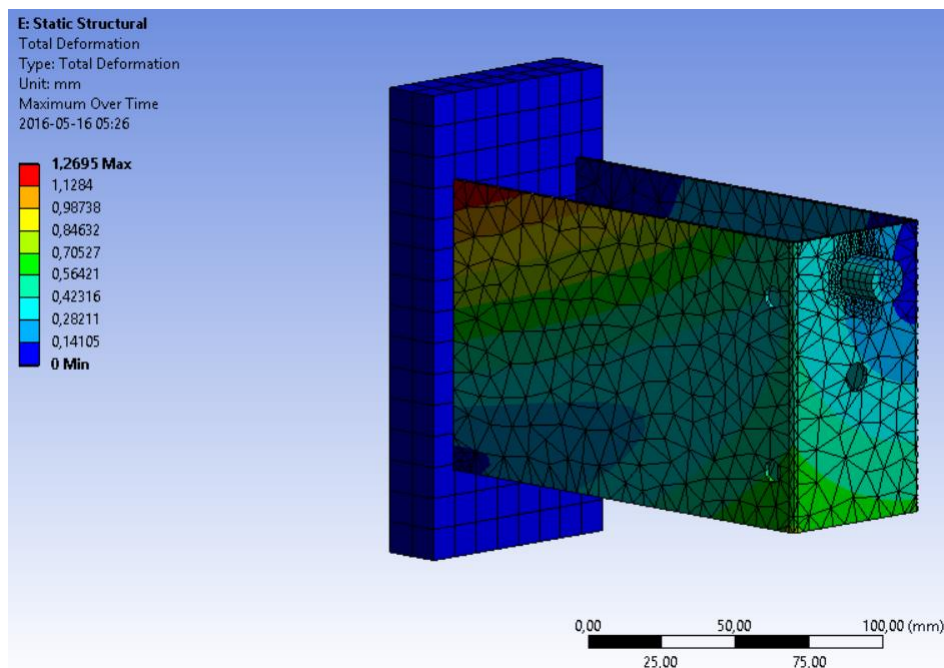
Ruuvin vetolujuus, jolla kiinnike kiinnitetään, pitää olla vähintään 758 N pintamateriaalista riippumatta.

## 6.2.2 Kiinnikkeen analysointi ANSYS -ohjelmalla

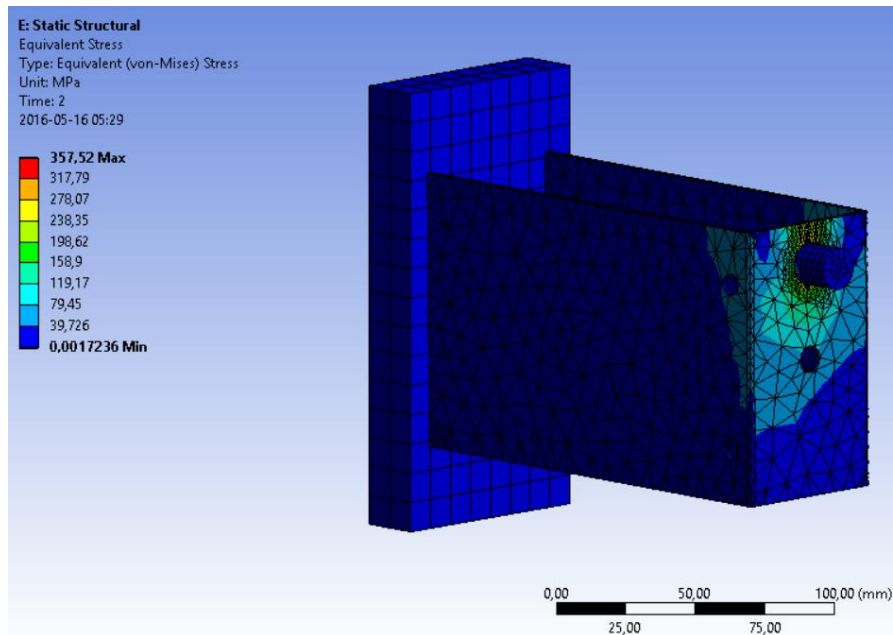
Kiinnikkeen muodonmuutoksia ja jännityksiä tutkitaan alustavasti Ansys ohjelmalla. Ansys:n materiaalikirjastosta valitaan aluksi mallintamisessa käytettävät materiaalit. Betonin ominaisuuksina käytetään Ansys:n kirjastossa valmiina olevaan *concrete* materiaalia. Kiinnikkeessä käytettävää teräslautaa ei Ansys:n kirjastossa ole valmiina, joten teräksen materiaaliominaisuudet pitää erikseen syöttää Ansykseen. Kiinnike valmistetaan materiaalista samasta materiaalista kuin nykyisen järjestelmän kiinnikkeet.

Kiinnike mallinnetaan kiinnittävän ruuvin ja kiinnityspintana olevan betonin kanssa. Mallille asetetaan kuormat kahdessa osassa. Ensimmäisessä osassa ruuvi kiristetään esijännitykseen, jonka jälkeen kiinnikkeeseen kohdistetaan siihen kohdistuvat kuormat, jotka ovat laskettuna luvussa 6.2.1. Liitokset ruuvin, kiinnikkeen ja betonin välillä ovat kitkaisia. Teräsosien välillä kitkakertoimenä on käytetty arvoa 0,2 ja betonin ja teräksen välisessä pinnassa on käytetty kitkakerrointa 0,57. Ansyksella ratkaistaan kaksi ratkaisua: Kiinnikkeen maksimi siirtymät ja maksimijännitykset.

Kuormitustapaus 1: Vain oma paino  $g_{j\ddot{a}r}$  (kuva 26 ja 27).



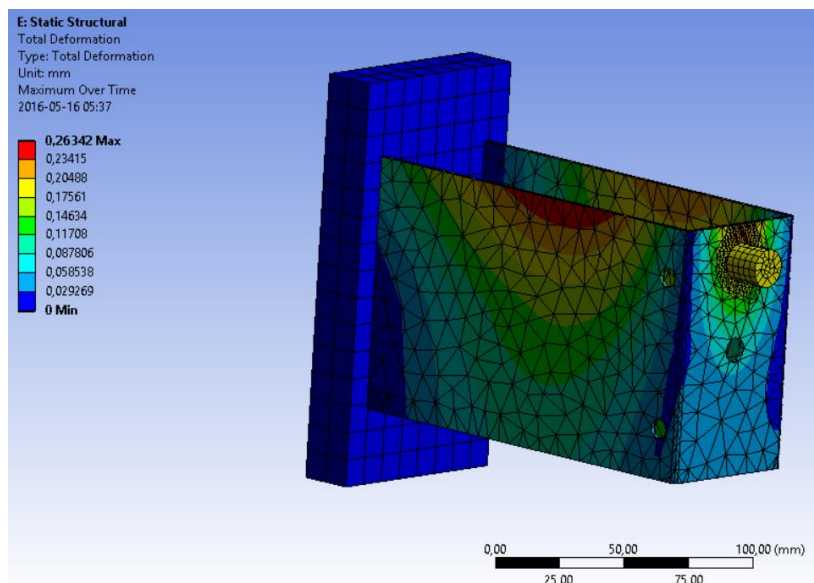
**Kuva 26.** Kuormitustapaus 1, Total Deformation



**Kuva 27. Kuormitustapaus 1, Equivalent Stress**

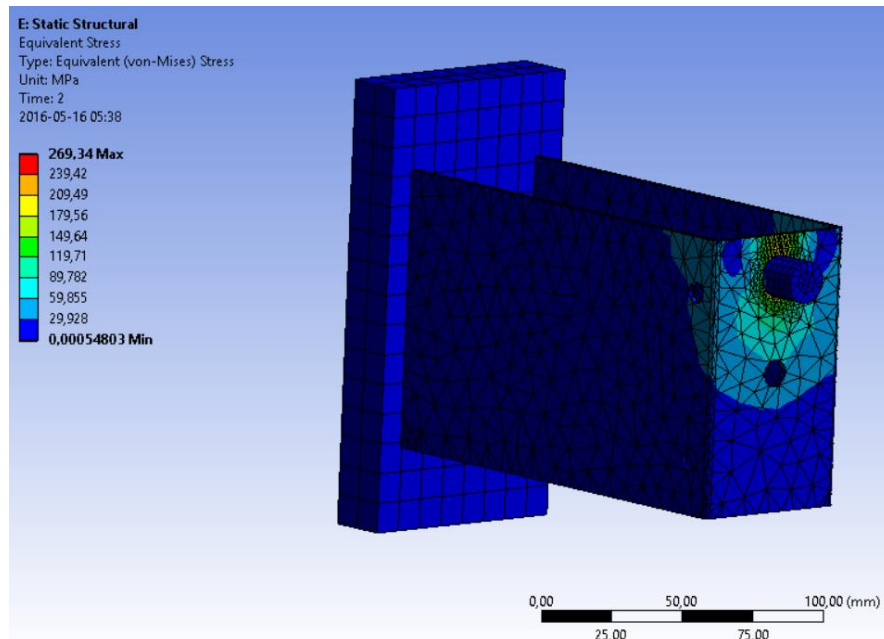
Kuormitustapauksessa yksi kiinnikkeen siirtymät ovat vähäisiä, noin 1,2mm. Siirtymät johtuvat kiinnikkeen kiertymisestä. Kiertymistä tapahtuu yksittäisessä kiinnikkeessä, mutta järjestelmässä sitä ei tapahdu, koska pystykiskot estävät kiinnikkeen kiertymisen. Suurin jännitys (357 MPa) johtuu ruuvin esijännityksestä, joka on tässä tapauksessa 500 N. Jännitys ei ylitä teräksen myötörajaa.

Kuormitustapaus 2: Omapaino  $g_{j\ddot{a}r}$  ja tuulen paine  $W_p$  (kuvat 28 ja 29).



**Kuva 28. Kuormitustapaus 2, Total Deformation**

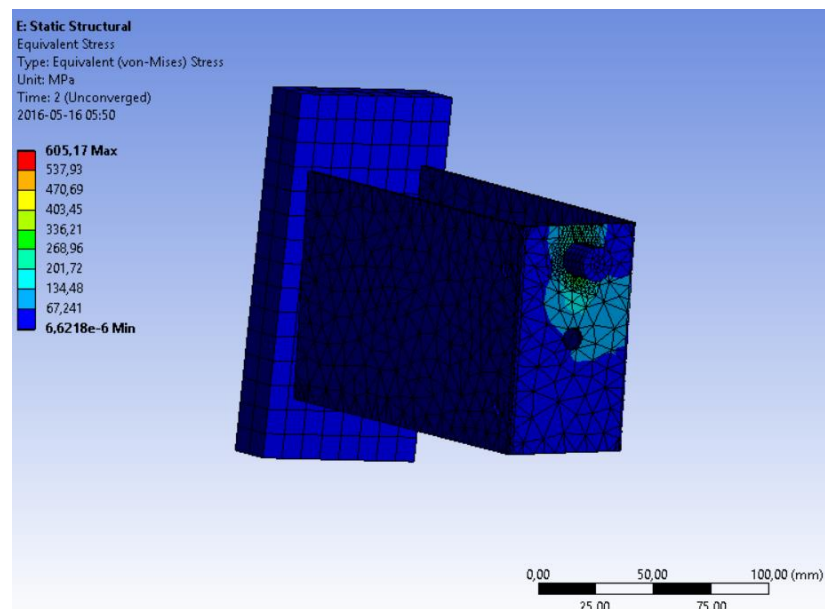




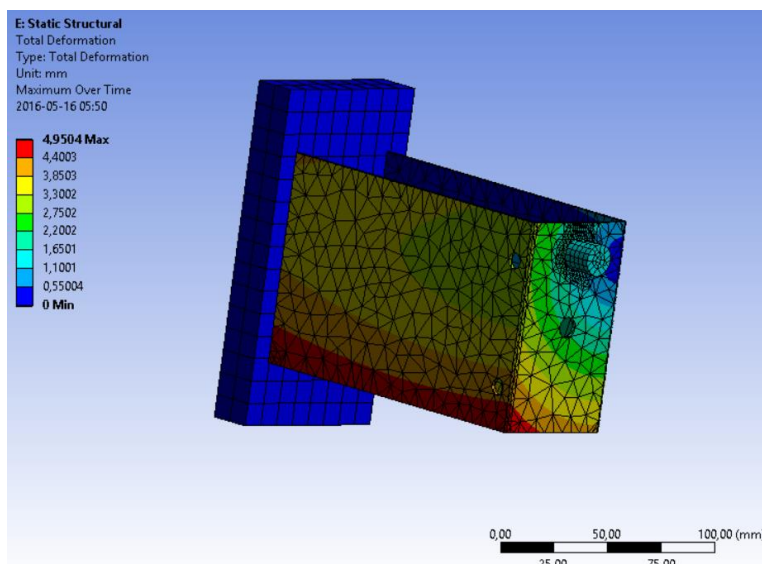
**Kuva 29. Kuormitustapaus 2, Equivalent Stress**

Tuulenpaine tukee kiinnikettä tiukemmin betoniseinää vasten ja näin vähentää järjestelmän omasta painosta johtuvia muutoksia. Paine myös helpottaa jännitystä ruuvien esijännityksen jälkeen. Kuormitustapauksessa 2 ruuvien kannan ympärillä oleva jännitys on pienempi, noin 269 MPa, kuin kuormitustapauksessa 1. Myös maksimi siirtymä on kuormitustapauksessa 1:ssä suurempi. Kuormitustapauksessa 2 maksimi siirtymä on vain 0,26 mm.

Kuormitustapaus 3: Omapaino  $g_{j\ddot{a}r}$  ja tuulen imu  $W_i$  (kuvat 30 ja 31)



**Kuva 30. Kuormitustapaus 3, Equivalent Stress**



**Kuva 31.** Kuormitustapaus 3, Total Deformation

Kuormitustapauksessa 3 siirtymät ja jännitykset ovat suurimpia. Siirtymä kiinnikkeen alareunassa on 4,95 mm. Siirtymä tarkoittaa kiinnikkeen kiertymistä. Kiinnikkeen kiertyminen estyy itse järjestelmässä, jossa kiinnikkeet ovat yhdessä toisiinsa pystykiskojen kautta. Kiinnikkeen etuosassa, ruuvien kannassa jännitys kasvaa 605 MPa. Jännitys johtuu ruuvien esijännityksestä ja tuulen imukuormasta. Maksimijännitys on kuitenkin pienellä alueella, eikä se aiheuta kiinnikkeessä muodonmuutoksia.

## 6.3 Kiinnikkeen kokeellinen kuormittaminen

Tässä luvussa esitetään kiinnikkeen konkreettisen testauksen tapa ja niiden tulokset. Testaus on karkeaa, mutta tarkoituksena on selvittää kiinnikkeen murtumis- ja pettämistavat. Kuormitustestien jälkeen kiinnikettä kehitetään saatujen tulosten perusteella. Kuormituskokeiden tarkemmat tulokset ovat liitteessä 4. Tässä luvussa esitellään kokeiden suorittaminen ja tuloksien yhteenveto.

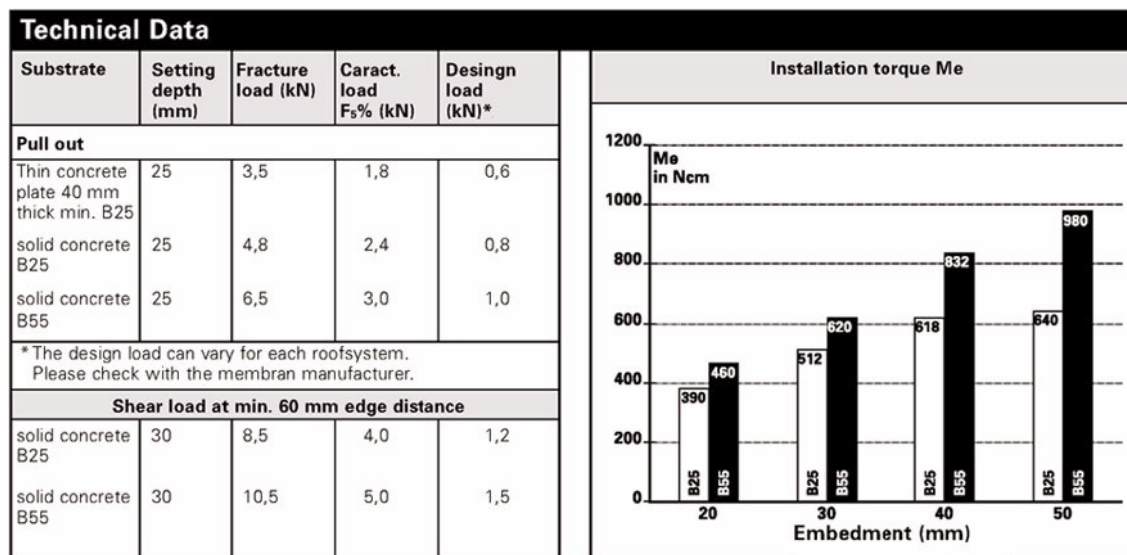
### 6.3.1 Testien suorittaminen

Kiinnikkeen testaus suoritetaan Stofix Ab:n verstaalla Norsborgissa, Ruotsissa. Testeissä käytetään kiinnikkeen asennuspintana verstaan betonirakenteita. Betonirakenteiden betonin lujuusluokka on C30. Kiinnikkeille tehdään kolme eri kuormitustestiä. Hajonnan ollessa suurta, tehdään kuormituksia lisää, jotta voidaan varmistua kiinnikkeen oikeasta kestävydestä. Kiinnikettä kuormitetaan pääsääntöisesti yksittäisinä kappaleinaan. Testeissä, joissa koko järjestelmän yhteistoimivuus on olennainen tekijä, käytetään lisänä toisia kiinnikkeitä. Tarkoituksena on simuloida kiinnikkeelle tulevia oikeita kuormituksia ja testata kiinnikkeen murtumismekanismeja. Testeissä testataan myös kiinnittävän ruuvien kestävyyttä ja sen asennusmomenttia.

Kuormien simulointiin käytetään vetokoelaitetta ja punnuksia. Testeissä käytetyt teräksiset punnukset painavat 3,9 kg kappale. Näitä punnuksia lisätään kuormiin kuormitustavasta riippuen kappale kerrallaan murtoon asti.

### 6.3.2 Ruuvien vetolujuus

Kuormitustesteissä kiinnittävänä ruuvina käytetään kuumasinkittyä betoniruuvia TI-6,3x235. Vetokoe laitteena PIAB:n vetokoelaitetta. Laitteen kapasiteetti on 500 kg ja tarkkuus  $\pm 0,6 \%$  maksimikuormasta. Ruuvien asennussyvyys on 65 mm. Valmistajan tietojen mukaan (kuva 32) kyseisen ruuvien murtolujuus 30 mm asennussyvyydellä 8,5 kN B25 betonissa. Suunnittelukuormaksi annetaan 1,2 kN. Kiinnitysruuvien minimi vetolujuus on 758 N ja se täytyy tässä ruuvissa. Valmistajan tietojen perusteella voidaan siis lähtökohtaisesti olettaa, että ruuvi tulee kestävänsä siihen tehtävät vetokokeet.



Kuva 32. TI-6,3x235 tekninen data (SFS, 2016)

Valmistajan ohjeiden mukaan perusluokan betoniin asennettaessa tulee käyttää halkaisijaltaan 4,8mm poranterää. Kovassa betonissa voidaan käyttää 5,2 mm terää. Näissä kuormitustesteissä käytettävän poranterän halkaisija on 5,0 mm.

Vetokokeen suoritustapa on esitetty kuvassa 33. Ruuvia varten porataan 5,0 mm asennusreikä, jonka jälkeen reikä tyhjennetään pölystä imurilla. Ruuvi asennetaan oikeaan asennussyvyyteen 65 mm. Ennen vetoa ruuvien pituus mitataan. Kuormituksen aikana ruuvien venymä mitataan. Mitoissa tulee kuitenkin ottaa huomioon käytettyjen prikkujen määrä. Vetokoelaitteesta ja ruuvien pienestä kannasta johtuen, vetokokeissa käytettiin kolme eri priikkaa. Vedettäessä priikat myös taipuvat, joka saattaa aiheuttaa ylimääräistä venymistä mittaustuloksissa.



**Kuva 33.** Vetokokeen suorittaminen

Vetokoetestejä tehtiin ruuville kaikkiaan viisi. Kaikki testit päättyivät vetokoelaitteen kapasiteetin loppumisen. Vetokokeiden tulokset ovat esitetty taulukossa 10.

**Taulukko 10.** Vetokuormitusten yhteenveto

Kuormitus	Max voima [kg]	Max venymä [mm]	Pysyvä muodon- muutos [mm]
1	500	2,2	0
2	500	1,2	0
3	500	1,7	0
4	500	3,2	0
5	500	1,2	0

Testeissä selvisi, että ruuvi kestää helposti siihen kohdistuvat kuormat, joita sille tulee kiinnikkeen toiminnassa. Testeissä pitää kuitenkin ottaa huomioon, että kiinnitettävä betonipinta on hyvälaatuinen. Siinä ei ole halkeamia ja se on sisätiloissa. Betonin laatu voi vaihdella paljonkin. Tästä syystä ruuvien kiinnitykselle on laskettava suuri varmuuskerroin. Varmuuskerroin ei aina taa toimivaa ruuvia, vaan kiinnitysruuvien tehokkuus tulee varmistaa aina tapauskohtaisesti.

Huomioitavaa poraamisessa ja asennuksessa on se, että porareikä tulee puhdistaa pölystä ja tomusta ennen ruuvien asentamista. Porareikä tulee porata asennussyvyyttä syvemmäksi, jotta ruuvien kiinnitys onnistuu.

### 6.3.3 Ruuvien kiinnitysmomentti ja kiinnikkeen nurjahtaminen

Kiinnikkeen muoto on sellainen, että kiinnikkeen etuseinä tulee jäämään ilmaan, eikä se tule mitään päin. Ruuvia kiristettäessä kiinnikkeen etuseinä taipuu taaksepäin tyhjään tilaan ja kiinnikkeen sivuseinämät voivat myös pullistua tai painua kasaan Testin tarkoituksena on selvittää millä voimalla kiinnittävä ruuvi voidaan asentaa ja mitä tapahtuu, kun ruuvien kiinnitystä kiristetään murtoon saakka.

Kiinnikkeiden asennuksen voimaa tutkitaan momenttiavaimen avulla. Ruuvi asennetaan päin kiinnikettä, jonka jälkeen sitä kuormitetaan asteittain aina suuremmalla momentilla, kunnes kiinnike tai ruuvi murtuu. Kuvassa 34 on asennettuna kiinnike, jota aloitetaan kiristämään momenttiavaimella pienin askelin. Kuvassa 35. momenttiavaimella kiristetty kiinnike.



**Kuva 34.** Kuormitettava ruuvi ja kiinnike



**Kuva 35.** 14 Nm kiristetty ruuvi

Kaiken kaikkiaan kiristysä tehtiin kiinnikkeille viisi kertaan. Jokaisella kerralla murto tapahtui kiinnittävissä ruuvissa. Yhteenveto on taulukossa 11.

**Taulukko 11.** Murtumismomentit ja -tapa

Kuormitus	Murtumis momentti [Nm]	Etuseinämän painuma murto- kohdassa [mm]	Murtumistapa
1	18	1,85	Ruuvi katkesi vääntömomentista
2	20	3,94	Ruuvi katkesi vääntömomentista
3	18	1,2	Ruuvi katkesi vääntömomentista
4	18	3,65	Ruuvi katkesi vääntömomentista
5	19	2,1	Ruuvi katkesi vääntömomentista

Kaikissa kuormitustapauksissa murtuminen tapahtui ruuvissa. Ruuvit leikkaantuivat (kuva 36) vääntömomentin vaikutuksesta aina samasta kohtaa, ruuvien kierteiden alusta. Kiinnikkeen etuseinään tuli painumia, mutta kiinnikkeen muodonmuutokset tai nurjahtaminen eivät ole riskitekijöitä kiinnikkeen ruuvien asentamisessa. Testien perusteella ruuvit voidaan kiinnittää seinään 10 Nm voimalla. Kiinnikkeeseen tulee pieniä muodonmuutoksia, mutta ne ovat niin vähäisiä, ettei niillä ole merkitystä kiinnikkeen toimivuuteen.





*Kuva 36. Ruuvi katkennut kuormituksessa*

#### 6.3.4 Maksimi veto

Maksimiveto -testin tarkoituksena selvittää kiinnikkeen kestävyys vetoa vastaan. Tällä kokeella simuloidaan tuulikuorman imua. Testissä oletetaan muun järjestelmän kestävä vetorasituksen. Kiinnike ja järjestelmä ovat sitkeitä, eikä siihen synny nopeasti murtumisia. Kiinnikkeen katsotaan pettäneen, kun muodonmuutokset ovat kasvaneet liian suuriksi. Aikaisemmin tehtyjen ruuvien vetotestien perusteella voidaan olettaa, ettei vetotestissä ruuvien kiinnitys ole riskitekijänä.

Kiinnike asennetaan lattiapintaan etuseinä ylöspäin. Kiinnikkeeseen asennetaan jatkokisko ja pieni kappale eristyskiskoa. Eristyskiskoon ruuvataan kiinni 8 mm pultti. Pulttia vedetään ylöspäin ruuvien vetokokeessa käytetyllä laitteella, PIAB:lla (Kuva 37). Vedettäessä ruuvista, voidaan vetolaitteen mittarista lukea suoraan kiinnikkeeseen vaikuttava kuorma. Tämä kuormitus kuvastaa tarkasti, miten myös oikea tuulikuorma vaikuttaa kiinnikkeeseen. Veto tulee eristyskiskoille asennuskiskoista ruuvien välityksellä. Tämä testi kuvaa asennuskiskojen kautta tulevaa vetoa eristyskiskoihin ja sitä kautta kiinnikkeeseen.

Kiinnikkeen viereen asetetaan mitta, jonka nollakohta sidotaan 10 cm kohdalle. Kiinnikettä lähdetään vetämään ylöspäin vetolaitteella asteittain. Tarpeeksi suuren kuorman jälkeen kiinnike alkaa taipua ylöspäin ja kiinnikkeen sivu alaa liikkua sivulle päin. Mitalla mitataan, kuinka paljon kiinnikkeen sivu liikkuu imukuorman vaikutuksesta. Kiinnikkeen kuormitusten yhteenveto on taulukossa esitetty taulukossa 12.

**Taulukko 12.** Kuormat ja kiinnikkeen sivun siirtymä

Kuormitus	Kuorma, jolla sivun siirtymä ylittää 5 mm rajan [kg]	Taipuma 150kg [mm]	Tapuma 200kg [mm]	Taipuma 300kg [mm]
1	150	5	13	107
2	150	5	12,5	109
3	150	5,2	12	115

Vetokuormien tulokset osoittavat, että kiinnike kestää siihen kohdistuvan tuulen imu-kuorman. Ensimmäisen 100kg (981 N) kuorman jälkeen kiinnikkeen toisen puolen sivu on liikkunut 2 mm. Kiinnikkeelle luvussa 6.2.1 määritetty tuulikuormasta aiheutuva imu on -607,7 N. Todellisuudessa kiinnikkeen sivu ei liiku 2 mm 100 kg: n kuormasta, koska kiinnike asennetaan eristeen sisälle. Ympärillä oleva eriste estää kiinnikkeen liikkumisen. Kuormat, joita sivun liikkuminen aiheuttaa ovat pieniä. Kun kiinnike ei pääse kääntymään, siirtyy suurempi osa kuormista ruuvien vedoksi, jossa kapasiteettia on paljon. Yksi ruuvi kestää vetotestien mukaan vähintään 500 kg (4,9 kN) vetoa.



**Kuva 37.** Kiinnikkeen vetokuormitus. Kiinnike, jatkokiinnike, eristyskisko. Eristyskiskossa 8 mm ruuvi, jota vedetään vetolaitteella.



Kiinnike ei murru vetokokeessa, mutta sen muodonmuutokset tulevat määrääviksi. Kiinnikkeen lopullinen muoto on esitetty kuvassa 37.



***Kuva 38.** Kiinnike vetokokeen kuormituksen jälkeen. Kiinnikkeen oikea puoli pysyy lähes muuttumattomana. Myötääminen tapahtuu kiinnikkeen etuosassa ja vasemman puoleisessa sivussa.*

### 6.3.5 Maksimi puristus

Maksipuristus -testin tarkoituksena on simuloida tuulenpainetta, olettaen, että muu järjestelmä kestää siihen kohdistuvat kuormat. Puristuskuorman mittaamisen haastava osa on saada kuorma vaikuttamaan kiinnikkeeseen kohtisuoraan. Pienikin sivuttainen kuorma voi kääntää kiinnikettä, jolloin voimat kasvavat nopeasti kiinnikkeessä ja järjestelmässä. Yksittäisen kiinnikkeen puristuslujuuden määrittäminen ei ole kannattavaa. Kiinnike on osa runkosysteemiä, jossa kiinnikkeet tuketuvat toisiinsa pysty ja vaakakiskoilla. Pysty ja vaakakiskot estävät kiinnikkeen kaatumisen, joka on mahdollista yksittäisellä kiinnikkeellä hyvin pienilläkin kuormilla ja pienillä sivuttaiskuormilla. Tässä kuormitustestissä on käytetty kahta kiinnikettä. Kuormat asetetaan kuitenkin vain toisen kiinnikkeen päälle. Toisen kiinnikkeen ja asennuskiskojen merkitys on vain simuloida paremmin muiden kiinnikkeiden tukevaa toimintaa. Kuormitettavan kiinnikkeen viereen, 600 mm päähän asennetaan toinen kiinnike. Molempiin asennetaan jatkokiinnikkeet ja eristyskiskot. Kiinnikkeet yhdistetään kahdella asennuskiskolla. Asennuksen jälkeen asennuskiskojen

päälle aletaan lisätä painoa, joka simuloi tuulikuormaa. Kuormitettava rakenne on esitetty kuvassa 39.



**Kuva 39.** *Puristuskuorman kuormitustestin alkutilanne*

Alkutilanteen jälkeen vasemmanpuoleisen kiinnikkeen päälle lisätään kuormaa, kunnes rakenne pettää. Kuormat asetetaan suoraan kiinnikkeen päälle. Vieressä olevan kiinnikkeen tarkoitus on vain tukea sivuttaista liikettä, niin kuin järjestelmä toimii muutenkin. Toinen kiinnike pitää kuormitettavaa kiskoa pystyssä, mutta se ei ota mitenkään muuten kuormia vastaan tai ne ovat erittäin vähäisiä.

Kiinnike kesti puristusta noin 194 kg (1907 N) (Kuva 40), ennen kuin se notkahti. Tämä kuorma on luvussa 6.2.1 laskettua lukua noin 4,4 kertaa isompi. Näin suuren varmuuden vuoksi tätä kuormitusta ei toistettu kuin kerran. Tämän testin perusteella on selvää, että kiinnike kestää tuulenpaineesta johtuvan puristuksen.



*Kuva 40. Puristuskuormaa kiinnikkeen päällä noin 190 kg.*

### 6.3.6 Maksimi paino/veto alas.

Tämän kuormituksen tarkoituksena on simuloida tiililaattaelementtien kantoa ja sen varmuutta. Ulkoseinärakenteena kiinnitysjärjestelmään voidaan asentaa myös ulkoisia esineitä, kuten tikkaat. Kiinnikkeen todellista kantoa on tästä syystä myös tärkeää tutkia. Tikapuista ja niiden käytöstä kiinnikkeisiin kohdistuu lisäkuormia.

Kiinnikkeen vetoa alas testattiin kiinnittämällä kiinnikkeen ja jatkokiinnikkeen lisäksi myös eristyskisko. Kuormaa ripustettiin roikkumaan eristyskiskoon. Kuormana testissä käytettiin etukäteen punnittuja teräspainoja. Eristyskiskoon kiinnitettiin muovinen, astia, johon lisättiin painoa yksi punnuskerrallaan. Jatkokiinnike sekä eristyskisko on asennettu maksimi pituuteen, jolloin myös kuromista aiheutuvat momentit ovat suurimmillaan. Kuormituksen tuloksien yhteenveto on esitetty taulukossa 13.

*Taulukko 13. Kiinnikkeen vetoalas -testin murtokuormat*

Kuormitus	Siirtymä mitoituskuormalla [mm]	Huomio
1	5,08	Kiinnitys ylimmässä reiässä
2	4,02	
3	5,65	
4	2,25	Kiinnitys keskellä
5	0,17	Kiinnitys molemmissa rei'issä

Ensimmäisen kolmen kuormituksen jälkeen huomattiin, että kiinnike kiertyy pienilläkin kuormilla. Kiertyminen johtuu kiinnitystavasta, jossa kiertymistä estää pelkästään kitka. Kuormituskokeessa kiinnityspintana oli maalattu betoni. Maalattu betoni vähentää teräksen ja betonin välistä kitkaa huomattavasti. Kiertymisen estämiseksi tarvittavat kuormat eivät ole kuitenkaan suuria. Ympärillä olevat eristeet estävät kiertymisen helposti. Lisäksi jos kiertyminen on estetty, painaa kuormittava voima kiinnikkeen alareunaa momentin vaikutuksesta tiukemmin seinää vasten. Tämä myös lisää kitkavaikutusta ja vähentää kiertymistä. Mitä suurempi kuorma on, kun kiertyminen on estetty, sitä tiukemmin kiinnike painautuu seinää vasten. Kuormituksiin 4 ja 5 muutettiin kiinnitystapaa, koska haluttiin tutkia, miten ruuvien sijoitus vaikuttaa kiertymiseen. Päätökseen vaikutti myös ruuvien vetokokeiden tulokset, jossa selvisi, että kiinnittävän ruuvin kapasiteetti riittää ottaman vastaan momentista aiheutuvan kuorman myös lyhyellä momenttivarrella. Lyhyellä momenttivarrella tarkoitetaan reiän mittaa kiinnikkeen alareunasta. Vaikutus kiertymiseen on nähtävissä taulukossa 13 ja tarkemmin liitteessä 4. Huomattiin, että kiinnityksen ollessa keskellä, kiinnike kiertyy noin puolet vähemmän kuormituksen alussa verraten kuormituksiin 1-3. Kiinnityksen ollessa molemmissa rei'issä, kiertyminen on erittäin vähäistä mitoituskuormilla. Todellisuudessa kiertyminen on estetty, koska kiinnike on asennettu eristeen sisälle. Lisäksi järjestelmä estää kiertymistä.

Alustavissa laskelmissa kriittisenä kohtana pidettiin kiinnikkeen betoniseinään liitoksissa olevaa kiinnikkeen alareunaa ja sen jännityksiä. Konkreettisissa kuormituksissa selvisi, että alareunan liitos ja sen toiminta ei ole ratkaiseva tekijä on kiinnikkeen kiertyminen.

## 7. TULOSSIEN ANALYSOINTI JA LOPPUPÄÄTELMÄT

### 7.1 Kuormitustestien tulokset

Kiinnikkeen testeillä saatiin simuloitua hyvin kiinnikkeeseen kohdistuvia kuormia ja saatiin selville mitkä ovat kiinnikkeen heikkoudet ja murtumistavat. Kuormitustestien perusteella voidaan todeta, että kiinnike kestää siihen kohdistuvat kuormat. Kiinnikettä testattiin kussakin testissä yksittäin, pois lukien puristustesti, jossa käytettiin toista kiinnikettä tukemaan sivuttaisia siirtymiä. Vaikka kiinnikkeitä testattiin yksittäin, pystyi se ottamaan vastaan siihen kohdistuvat kuormat sallituissa rajoissa. Tästä johtuen kiinnikkeiden kestävyudessa on suurta varmuutta. Suuri varmuus perustuu siihen, että järjestelmä toimii systeeminä, eikä kiinnikkeet yksittäisinä osina. Järjestelmän toimiessa yhdessä, poistaa se kuormituksia yksittäiseltä kiinnikkeeltä, joita näissä kuormitustesteissä kohdistui yksittäiseen kiinnikkeeseen. Järjestelmä ja eristelevyt estävät kiinnikkeen kiertymisen, mikä oli suurin ongelma yksittäisissä kuormitustesteissä. Järjestelmä estää myös sivuttaisia siirtymiä. Vaaka- ja pystykiskot ovat ruuvattuna toisiinsa kiinni, muodostaen jäykän mutta sitkeän pintakerroksen. Yhtenä kerroksena kiinnikkeet eivät voi kaatua, koska vaakasuuntaiset asennuskiskot ottavat kuormia vastaan estämällä kiinnikkeiden välimatkan kasvua tai pienentymistä. Yhtenäisen pinnan ansiosta myös pistemäiset kuormat jakautuvat todellisuudessa useammalle kuin yhdelle kiinnikkeelle. Jäykkä tilielementti jakaa pistemäisiä kuormia laajemmalle alueelle ja tätä kautta kiinnikkeille.

Suurin ongelma kuormitustesteissä oli kiinnikkeen kiertyminen. Kiertyminen aiheutuu kiinnikkeen kiinnitystavasta, jossa kiertymistä estää pelkästään kiinnikkeen ja kiinnikepinnan kitka. Kiertymistä kuormitustesteissä lisäsi myös kiinnityspinnassa oleva maalipinta, joka teki betonin pinnasta todellisuutta liukkaamman. Testeissä testattiin myös alustavasti estämällä kiertyminen. Tällöin suurella kuormalla, yli 90kg, kiinnike alkoi valua alaspäin. Valuminen alaspäin johtui myös kitkan vähydestä kiinnikkeen ja betonin välillä. Lisäksi valumiseen ja kiertymiseen vaikuttaa kova betonipinta. Jos betonipinta ei anna myöden yhtään tai hyvin vähän, ei kiinnike painaudu betoniin. Mikäli kiinnikkeen ja kiinnikkeen välissä oleva kitka olisi riittävän suuri, estäisi se kiinnikkeen liukumista pinnalla ja näin ohjata kuormia kohti kiinnikepintaa. Tällöin kiinnike myös painautuisi betoniin ja tätä kautta tarrautuisi kiinnikepintaan tehokkaammin. Tällöin myös tarrautuminen estää kiinnikkeen kiertymistä ja suurilla kuormilla kiinnikkeen valumista. Valuminen alkoi kuitenkin mitoituskuorma noin 4,5 kertaa isommalla kuormalla, joten kiinnikkeen valuminen ei ole riski.

Alussa yhtenä rajoittavana tekijänä pidettiin kiinnittävän ruuvien vetolujuutta. Ruuvien vetotesteissä kuitenkin selvisi, että kiinnittävän ruuvien vetolujuus on niin suuri, ettei se

ole ratkaiseva tekijä kiinnikkeen murtumisessa. Kiinnikkeen kestävyys ja taipumat ovat rajoittavia tekijöitä, ei ruuvien vetolujuus. Vetolujuutta testattiin myös kuormittamalla kiinnikettä niin, että kiinnitys oli pelkästään keskimmäisestä reiästä. Ruuvien ollessa keskimmäisessä reiässä siihen vaikuttavat voimat kasvavat nopeasti, kun momenttivarsi pienenee ja kuormittava kuorma pysyy samana.

Kiinnikkeen vetokokeessa, jossa simuloitiin tuulikuormaa, ei myöskään ollut ongelmia kiinnikkeen kestävyysden kanssa. Mitoituskuormilla kiinnikkeen sivun siirtymä oli keskimääräisesti ~1 mm. Yksittäin asennettunakin kiinnike pystyy ottamaan vastaan tuulikuorman, ilman että muodonmuutokset ovat liian isoja. Asennettuna kovaan eristeeseen ei edes tätä 1 mm siirtymää tapahdu. Kova eriste estää kiinnikkeen sivun siirtymän. Tästäkin kiinnikkeen pettäminen aiheutui liian suurista muodonmuutoksista.

Yhteenvedona kiinnike kestää siihen kohdistuvat kuormat lyhyellä aikavälillä. Mitoituskuormilla ei kiinnikkeen myötörajoja ylitetä. Pitkän aikavälin tarkastelua ei voida näillä testeillä tehdä, mutta kiinnikkeiden varmuuden ollessa niin suuri, voidaan kiinnikkeiden olettaa kestävän kuormitukset myös pitkällä aikavälillä.

## 7.2 Kiinnikkeen asentaminen

Kiinnikkeiden on todettu kestävän siihen kohdistuvat kuormat, kun se asennetaan oikein. Asentamisen lähtökohtana on myös, että kiinnike saadaan asennettua oikein ja vasten kiinnityspintaa. Mikäli kiinnikkeen ja kiinnityspinnan väliin jää eristettä ja kiinnikkeen asennus jää vinoon, siihen vaikuttavien kuormien rasitukset ovat isompia. Kiinnike on suunniteltu toimimaan oikein asennettuna ja kuormat ovat testattu oikein asennettuihin kiinnikkeisiin. Tästä syystä on ehdottoman tärkeää, että kiinnike asennetaan seinään suoraan, ja niin kuin se on tarkoitettu.

Ennen kiinnikkeen asennusta eristeeseen tehdään kiinnikkeen sivuille valmiit reiät, joihin kiinnike työnnetään. Kun reiät ovat leikattu suoraan, on kiinnike helppo asentaa oikein. Tällöin myös kiinnike toimii oikein, ja se kestää siihen kohdistuvat kuormat niin kuin on suunniteltu. Alussa suunniteltu kiinnikkeen työntäminen eristeen läpi ei toimi käytännössä. Polyuretaanin leikkauslujuus ei ole iso. Kiinnikkeen läpiasentaminen on teoriassa helppoa. Käytännön testit osoittivat, ettei läpiasentaminen ole järkevä asennustapa. Kiinnikkeen ainevahvuus on 2 mm. Läpi työnnettäessä kiinnike leikkaa alussa eristettä helposti. Nopeasti polyuretaani alkaa kuitenkin pakkaantua ja kiinnike työntää edessään polyuretaania leikkaamatta sitä.

Eristelevyyyn tehdään asennusreiät tarpeeksi terävällä, mutta paksulla esineellä, joka ei paakkuunnuta eristettä, vaan leikkaa sitä siististi. On erityisen tärkeää, että leikkaamisvaiheessa asennuskolo saadaan tehtyä kokonaan kiinnikepintaan asti. Tällöin kiinnike voidaan asentaa helposti asennusreiästä pitkin, eikä eriste paakkuunnu kiinnikkeen edellä.

Kiinnike toimii vain oikein päin asennettuna. Kiinnikettä ei saa asentaa väärinpäin, vaan tulee aina varmistaa, että kierrereiät ovat kiinnikkeen vasemmalla puolella ja etuseinässä oleva reikä on yläpuolella. Kun kiinnike on asennettu eristeen sisään, porataan etuseinämässä olevan ylimmän reiän läpi reikä eristeen läpi kiinnityspintaan. Kiinnitysreikä pitää porata tarpeeksi syvälle. Jos kiinnikereikä jää lyhyeksi, ei ruuvia voida kiinnittää tarpeeksi syvälle, jotta se kiinnittäisi myös itse kiinnikkeen. Kuormitetun ruuvin asennussyvyys on 65 mm. Porareian syvyys pitää olla vähintään 20 mm syvempi kuin asennussyvyys, jotta ruuvin kiinnittäminen onnistuu. Porausvaiheessa pitää myös huolehtia edestakaisilla liikkeillä, että porauspöly saadaan pois porarei'istä. Jos porareikiin jää paljon pölyä, voi se estää ruuvin asennuksen kokonaan, tai vaikuttaa ruuvin vetolujuuteen.

### 7.3 Asennuksessa muut huomioon otettavat asiat

Asennettaessa polyuretaanieristelevyjä betonipintaan, tulee varmistaa, että eristeen ja betonin väliin ei jää ilmarakoja, jotka mahdollistaisivat konvektion. Diffuusiotiiviillä laminaatilla päällystettyjen polyuretaanilevyjen käytössä tulee ottaa huomioon, että betonin ja polyuretaanieristeen välissä oleva kosteus kuivuu sisälle päin rakennukseen. Samoin rakenteissa oleva rakennusaikainen kosteus kuivuu rakennuksen sisälle päin. Tämä pitää ottaa huomioon. Diffuusioavoimilla polyuretaanieristeillä rakenteen kuivuminen ulospäin on myös mahdollista, mutta se on hidasta. Asennuksessa pitää kiinnittää huomiota myös, siihen, ettei seinään asenneta märkiä polyuretaanilevyjä. Tällöin seinärakenteen ja polyuretaanilevyn väliin joutuu ylimääräistä kosteutta. Asennettavien polyuretaanilevyjen pitää olla kuivia.

Eristelevyjen saumat tulee vaahdottaa, jotta pinnasta saadaan tiivis. Jos polyuretaanilevyn tehdään reikiä, tulee reiät vaahdottaa myös polyuretaanieristeellä, jottei reikien kautta kulkeudu ylimääräistä kosteutta eristeen taakse.

Korjausrakentamisessa asennettavat pinnat ovat yleensä epätasaisia. Jollei eristeen taakse syntyviä ilmarakoja voida välttää, tulee vanha pinta tasoittaa ennen uuden eristeen asentamista.

Tässä työssä tutkittiin kiinnikkeen kiinnitystä betoniseinään ja todettiin kiinnikkeessä käytettävän ruuvin kestävän siihen kohdistuvat kuormat. Mikäli asennuksia tehdään muihin materiaaleihin kuin betoniin, tulee kiinnitysruuvin vetolujuus testata erikseen jokaiseen kohteeseen ja varmistuttava siitä, että kiinnitysruuvin vetolujuus on riittävä. Minimi kiinnitysruuvin vetolujuus on 0,76 kN. Kiinnitysruuvista riippuen maksimi kiristysmomentti, jolla kiinnike voidaan kiinnittää, on 10 Nm. Isommilla kiristysvoimilla kiinnikkeen etuseinä alkaa taipua. Liian suuret taipumat heikentävät kiinnikkeen toimintaa. Kiinnitysmomentti riippuu myös kiinnityksessä käytettävästä ruuvista. Valmistajat antavat ruuveille kiristysmomentin, jota pitää noudattaa. Mikäli ruuvia kiristetään liikaa, voi kiinnitysmateriaali rikkoontua tai ruuvia katketa. Kiinnitysmateriaalin rikkoontuminen heikentää ruuvin vetolujuutta.

## 8. YHTEENVETO JA JATKOTUTKIMUSTARVE

### 8.1 Yhteenveto

Diplomityön tavoitteena oli suunnitella kovan eristeen kanssa toimiva kiinnike Stofix -kiinnitysjärjestelmään. Samalla tavoitteena oli myös tutkia miten polyuretaanieristeellä eristetyt seinärakenteet toimivat palo-, lämpö- ja kosteusteknisesti sekä akustisesti. Seinärakenteen toimivuutta ja tutkittiin pääsääntöisesti RIL kirjasarjan avulla. Paljon haettiin tietoa myös eri standardeista. Teoriaosuudessa käsiteltiin teoreettisesti seinärakenteiden toimivuutta ja tuloksena saatiin selkeä käsitys siitä, miten polyuretaanilla eristetyt seinät toimivat rakennusfysikaalisesti. Mitkä ovat sen heikkoudet ja vahvuudet ja miten ne tulee ottaa huomioon. Molemmat tavoitteet täytettiin.

Kiinnikkeeseen kohdistuvat kuormat eivät ole isoja. Suurin mitoittava kuorma 1,5 varmuuskertoimella on tuulesta aiheutuva imu,  $\sim 600 \text{ N/m}^2$ , mikä helpotti kiinnikkeen suunnittelua. Myös valmis järjestelmä johon kiinnike suunniteltiin, antoi kiinnikkeelle hyvän lähtökohdan mistä lähteä liikkeelle. Ennen kuin kiinnikettä edes aloitettiin suunnittelemaan, oli kiinnikkeestä tiedossa jo monia asioita, joiden pitää kiinnikkeessä olla. Haastavaa kiinnikkeen suunnittelusta teki kuitenkin se, että vastaavia kiinnikkeitä ei ole juuri-kaan valmistettu. Kirjallisuustutkimuksessa tai lähteiden etsinnässä ei löytynyt yhtään vastaavanlaista kiinnikettä, mikä sai epäilemään kiinnikkeen toimivuutta. Kiinnikkeen toimivuutta laskettiin etukäteen yksinkertaisen statiikan avulla ja myöhemmin FEM -laskenta ohjelmistolla Kiinnikkeen mallintamisessa oli omia haasteita kitkapintojen kanssa. Suurilla kitkakertoimilla laskettaessa ANSYS -ohjelmistossa virhemarginaalin määrä kasvoi. Kuormitustestien jälkeen kuitenkin voidaan todeta, että alustavat laskelmat kiinnikkeen toimivuudet olivat oikeita. Pienilläkin kuormilla kiinnikkeeseen tulee siirtymiä, mutta siirtymät ovat siedettäviä. Todellisuudessa kitkan määrä vaihtelee, mitä ANSYS ei ota huomioon.

Kuormitustestien jälkeen kiinnike kesti siihen kohdistuvat kuormitukset. Kiinnikkeeseen tulee kuormituksissa muodonmuutoksia, mutta ne pysyvät raja-arvojen sisällä. Tässä pitää ottaa kuitenkin huomioon, että testit tehtiin yksittäisille kiinnikkeille ja silti kiinnikkeet kestivät. Todellisuudessa kiinnikkeet eivät pääse kiertymään järjestelmän ja eristeen sisään asennuksen vuoksi. Testeissä kiinnikkeen kiertyminen nousi suurimmaksi ongelmaksi.

Diplomityön tavoitteet saavutettiin. Uusi kiinnike suunniteltiin, se testattiin ja todettiin toimivaksi. Seinärakenteiden rakennusfysikaalisesta toiminnasta tehtiin riittävän laajui- nen tutkimus ja polyuretaaniset seinärakenteet todettiin myös oikein asennettuina toimiviksi.



## 8.2 Jatkotutkimustarve

Kuormitustestien perusteella suunniteltu kiinnike kestää siihen kohdistuvat kuormat. Kiinnikkeiden toimintaa tarkasteltiin kuitenkin yksittäin. Näin saatiin selville yksittäisen kiinnikkeen heikkoudet ja vaurioitumistavat. Kuormitustestien perusteella kiinnikettä tul-  
laan kehittämään lisää ja sen vaurioitumismekanismeihin pyritään etsimään ratkaisuja. Suurin ongelma kiinnikkeessä oli sen kiertyminen. Kiertymisen estämistä tai sen mahdol-  
lisuuden vähentämistä pitää tutkia lisää. Lisäksi kiinnikkeen jäykkyyttä pitää parantaa, jotta sen myötääminen alkaa vasta isommilla kuormilla. Kiinnikkeen mittojen optimointi. Lisätestien ja kuormitusten perusteella voidaan etsiä kiinnikkeelle parhaiten toimivat mi-  
tat. Kiinnikkeen pituus riippuu eristevahvuudesta, mutta kiinnikkeen leveyden ja korkeu-  
den vaikutusta pitää tutkia lisää.

Kiinnikkeen valmistustapaa pitää kehittää. Ensimmäisen erän kappaleiden viimeinen työ-  
vaihe toteutetaan työmaalla tai verstaalla. Tulevaisuudessa kiinnike pitää saada täysin  
valmiina käyttöön.

Kiinnikkeen toimivuutta koko muun järjestelmän kanssa pitää myös tutkia. Kiinnikkeen  
asennus on myös yksi ongelmakohta, johon ei ole täysin oikeaa tapaa. Kiinnikkeen asen-  
tamista pitää kehittää. Mahdollisesti kiinnikkeen asennustyöhön voidaan kehittää koko-  
naan oma työkalu.

## LÄHTEET

ASM International. 2002. Material Properties Database Committee. ASM ready reference: Thermal properties of metals, Chapter 2 Thermal Expansion.

Boverket. Saatavissa: <http://www.boverket.se/sv/samhallsplanering/stadsutveckling/miljonprogrammet/> Viitattu 19.3.2016

Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2005. SFS-EN 1991-1-4 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Tuulikuormat.

Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 2008. SFS-EN ISO 6946. Rakenne- ja rakennusosat. Lämmönvastus ja lämmönläpäisykerroin. Laskentamenetelmä.

Ilmatieteen laitos. [WWW] Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/saaennatyksia>. Viitattu 24.4.2016

Kingspan Insulation Oy. 2016. SPU detaljikirjasto.pdf. Saatavissa: <http://www.spu.fi/suunnittelu/detaljikirjasto/>. Viitattu 25.05.2016

Kylliäinen, M. & Hongisto, V. 2007. Rakennusten akustinen suunnittelu: akustiikanperusteet. Helsinki, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, RIL 243-1-2007.

Kylliäinen, M. 2006. Talonrakentamisen akustiikka. Tutkimusraportti 137. Tampereen teknillinen yliopisto, Rakennustekniikanlaitos.

Lindberg, R. 2004. Rakennusosien rakennusfysikaalinen toiminta. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK040302.pdf>. Viitattu 1.5.2016

Paroc Oy. 2016. Paroc Oy:n kotisivut. Ratkaisut ja tuotteet. Saatavissa: <http://www.paroc.fi/ratkaisut-tuotteet/tuotteet/pages/yleiseristeet/paroc-extra->. Viitattu 14.05.2016

Powell, F; Matthews, S. 1987. Thermal Insulation: Materials and Systems, Numero 922 ASTM International.

PU-Nordic. 2016. Polyuretaanista (PUR/PIR) valmistetut lämmöneristeet. PU-Nordic esite. Saatavissa: [http://www.pu-nordic.fi/files/pu-nordic/pdf/81228\\_PU\\_Nordic\\_lammoneriste\\_esite\\_spread\\_LR.pdf](http://www.pu-nordic.fi/files/pu-nordic/pdf/81228_PU_Nordic_lammoneriste_esite_spread_LR.pdf). Viitattu 8.5.2016

Rakennuksen julkisivun ääneneristävyuden mitoittaminen. 2003. Helsinki, ympäristöministeriö, ympäristöopas 108

Rakennusteollisuus. 2009. Asuinrakennusten äänitekniiikan täydentävä suunnitteluohje. Saatavissa: [http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21797/Suunnitteluohje\\_fi-nal\\_osa1.pdf](http://www.elementtisuunnittelu.fi/Download/21797/Suunnitteluohje_fi-nal_osa1.pdf). Viitattu 15.05.2016

Ruukki Oy. Ympäristöseloste: Metallipinnoitetut teräslevyt, ohutleht ja -kelat. Saatavissa: <http://www.ruukki.hu/~media/Finland/Files/Ymparistoselostet/Ruukki-Metallipinnoitetut-teraslevyt-ymparistotuoteseloste>. Viitattu 24.4.2016

Salmi, T; Pajunen, S. 2010. Lujuusoppi. Tampereen teknillinen yliopisto. Pressus Oy. Tampere.

Stofix. 2012. Asennusohje.

Stofix. 2014. Declare of performance. ETA hyväksyntä nro. 13/0624. VTT Expert Services Oy. Saatavissa: <http://stofix.fi/images/sertifikaatit/Suomi/Stofix%20DoP.pdf>. Viitattu 1.5.2016

Stofix Oy:n kotisivut. [WWW]. <http://stofix.fi/fi/yritys>. Viitattu 17.3.2016

Suomen rakentamismääräyskokoelma C1, 1998.

Suomen rakentamismääräyskokoelma E1. 2011.

Suomen rakentamismääräyskokoelma D5, 2012.

Svensk Mäklarstatistik. [WWW]. <http://www.maklarstatistik.se/maeklarstatistik/kommun.aspx?Main=Centrala%20Stockholm&LK=3003&Typ=Borater&Months=12&Ant=1473&Extra1=8888&Extra2=8888>. Viitattu 15.05.2016

SS 21054. 2009. Area och volym för husbyggnader – Terminologi och mätregler. SIS (Svensk Standard)

Tiivistalo. 2016. Tiivistalowiki. Saatavissa: <http://www.tiivistalo.fi/tiedostot/default.asp?sivu=tiivistalowiki>. Viitattu 2.5.2016

Vinha, J. & Käkelä, P. 2001. Tampereen teknillisen yliopiston julkaisu. Julkaisu 96. Vesihöyryn siirtyminen seinärakenteissa diffuusion ja konvektion vaikutuksetta. Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto.

VTT Expert Services Oy. 2016. Sertifikaatti NRO VTT-C-6665-11. Myönnetty 10.3.2011. Päivitetty 29.1.2016. Saatavissa: [http://spu.studio.crasman.fi/pub/Web-site+material/PDF+and+other+files/Certificates,+studies,+reports,+declarations/VTT-C-6665-11\\_FIN.pdf](http://spu.studio.crasman.fi/pub/Web-site+material/PDF+and+other+files/Certificates,+studies,+reports,+declarations/VTT-C-6665-11_FIN.pdf). Viitattu 30.4.2016.

VTT Expert Services Oy. 2009a Tutkimusselostus Nro VTT-S-01984-09. SPU -Systems Oy:n seinärakenteen korjauskonseptin kosteustekninen toimivuus. Saatavissa:

<http://spu.studio.crasman.fi/pub/Website+material/PDF+and+other+files/Certificates%2C+studies%2C+reports%2C+declarations/VTT-S-01984-09+SPU-julkisivukorjauskonseptin+kosteustekninen+toimivuus.pdf>. Viitattu 15.05.2016

VTT Expert Services Oy. 2009b. Tutkimusselostus Nro VTT-S-09443-09. Stonel Oy:n teräsohulevyruntoon ja ohueen tiililaattaverhoiluun perustuvan seinärakenteen korjausjärjestelmän käyttöä arvoiti. Saatavissa: [http://stofix.fi/images/sertifikaatit/Suomi/Stonel\\_Kyttik\\_Selostus\\_tarkempi.pdf](http://stofix.fi/images/sertifikaatit/Suomi/Stonel_Kyttik_Selostus_tarkempi.pdf). Viitattu 18.05.2016

## LIITE 1: VAADITTUJEN ERISTEPAKSUUKSIEN LASKENTA

Minimi ja maksimi eristysvahvuudet sekä niiden laskennalliset U -arvot standardin ISO 6946 mukaan.

Betonin lämmönjohtavuus	$\lambda_B = 1,7 \frac{W}{mK}$
Betonin paksuus	$d_B = 0,15m$
Polyuretaanilevyn lämmönjohtavuus	$\lambda_{PU} = 0,023 \frac{W}{mK}$
Polyuretaanilevyn paksuus	$d_{PU}$
Mineraalivillan lämmönjohtavuus	$\lambda_{MV} = 0,036 \frac{W}{mK}$
Mineraalivillan paksuus	$d_{MV}$
Sisäpinnan lämmönvastus (oletus)	$R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$
Ulkopinnan lämmönvastus (tuuletusväli)	$R_{se} = R_{si} = 0,13 \frac{m^2K}{W}$
Minimi lämmönläpäisykerroin	$U_{min} = 0,17 \frac{W}{m^2K}$
Rakennekerroksen lämmönvastus	$R = \frac{d}{\lambda}$

Homogeenisista kerroksista koostuvan rakenneosan kokonaislämmönvastus

$$R_T = R_{si} + R_1 + R_2 + \dots + R_n + R_{se}$$

Lämmönläpäisykerroin  $U = \frac{1}{R_T}$

Seinärakenteiden lämmönläpäisykertoimia eri eristevahvuuksilla.

Nr.	Betoni [m]	PU [m]	Mineraali- villa [m]	Kokonais eristepak- suus [mm]	Kokonaisseinäpaksuus [mm] (Sisältää tuuletusvälin ja Tii- lilaattaelementin paksuuden)	Lämmönlä- päisykerroin [W/m²K]
1.	0,15	0,03	0	30	265	0,61
2.	0,15	0,04	0,05	90	295	0,29
3.	0,15	0,05	0,05	100	305	0,26
4.	0,15	0,07	0,05	120	325	0,22
5.	0,15	0,08	0,05	130	335	0,20
6.	0,15	0,1	0,05	150	355	<b>0,17</b>
7.	0,15	0,12	0,05	170	375	<b>0,15</b>
8.	0,15	0,15	0,05	200	405	<b>0,13</b>
9.	0,15	0,16	0,05	210	415	<b>0,12</b>
10.	0,15	0,2	0,05	250	455	<b>0,10</b>
11.	0,15	0,23	0,05	280	485	<b>0,09</b>
12.	0,15	0,24	0,05	290	495	<b>0,09</b>
13.	0,15	0,25	0,05	300	505	<b>0,09</b>
14.	0,15	0,3	0,05	350	555	<b>0,07</b>

## LIITE 2: LÄMPÖLAAJENEMISEN VOIMAN JOHTAMINEN

Lämpölaajenemisen voima on laskettu Lujuusoppi (2010) kirjan kaavojen perusteella.

Kappaleen lämpöpiteneminen	$\Delta L = \alpha \Delta T L_0$	(1)
----------------------------	----------------------------------	-----

josta saadaan	$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$	(2)
---------------	--	-----

Venymä	$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$	(3)
--------	--------------------------------------	-----

Sijoitetaan venymä kaavaan (2), saadaan	$\varepsilon = \alpha \Delta T$	(4)
---	---------------------------------	-----

HOOKEEn laki	$\sigma = E \varepsilon$	(5)
--------------	--------------------------	-----

josta saadaan	$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$	(6)
---------------	----------------------------------	-----

Sijoitetaan kaava (6) kaavaan (4), saadaan	$\frac{\sigma}{E} = \alpha \Delta T$	(7)
--	--------------------------------------	-----

Kappaleen puristusjännitys	$\sigma = \frac{F}{A}$	(8)
----------------------------	------------------------	-----

Sijoitetaan kaava (8) kaavaan (7), saadaan	$\frac{F}{A} = \alpha E \Delta T$	(9)
--	-----------------------------------	-----

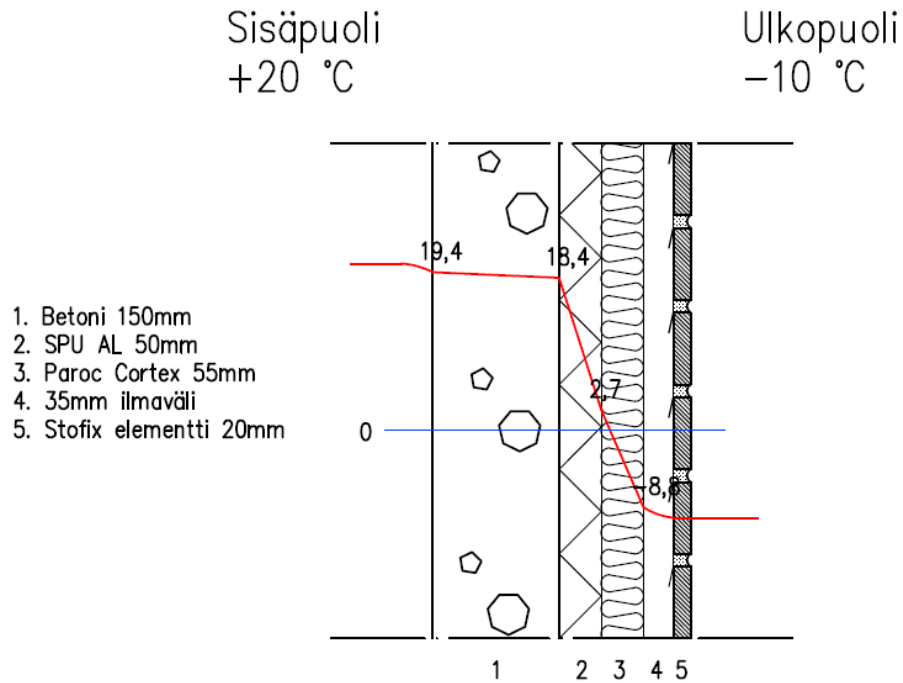
Josta saadaan edelleen lämpölaajenemisen voiman kaava (10)

$$F = \alpha \Delta T E A \quad (10)$$

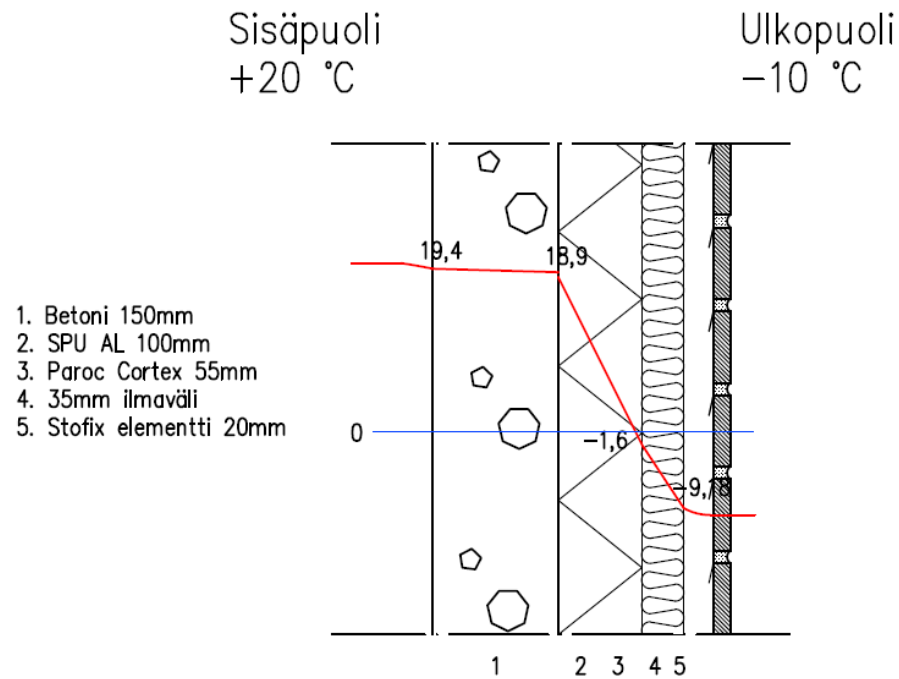
jossa  $\alpha$  [1/ °C]] on lämpölaajenemiskerroin,  $\Delta T$  [°C] lämpötilan muutos,  $E$  [GPa] materiaalin kimmomoduuli ja  $A$  [mm<sup>2</sup>] kappaleen vaikuttavan pinnan pinta-ala.

### LIITE 3: SEINÄRAKENTEIDEN LÄMPÖJAKAUMAT

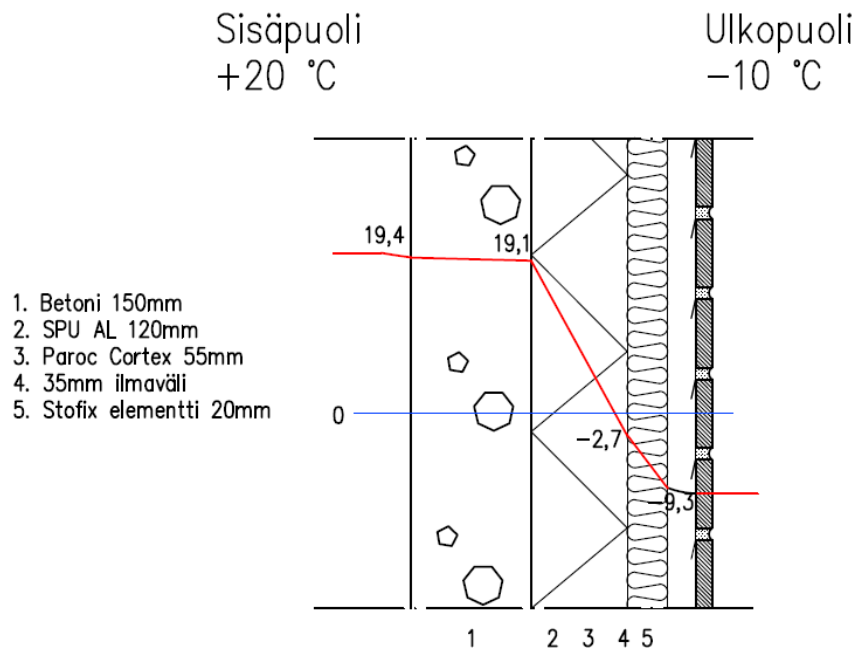
Rakenne 1:



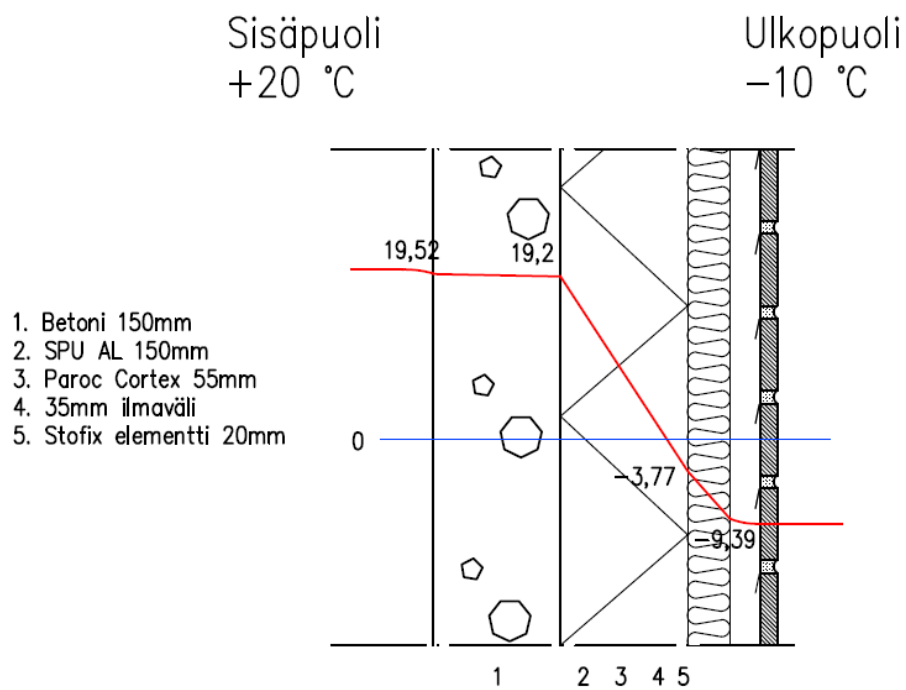
Rakenne 2:



Rakenne 3:



Rakenne 4:





## LIITE 4: KUORMITUSKOKEIDEN TULOKSET

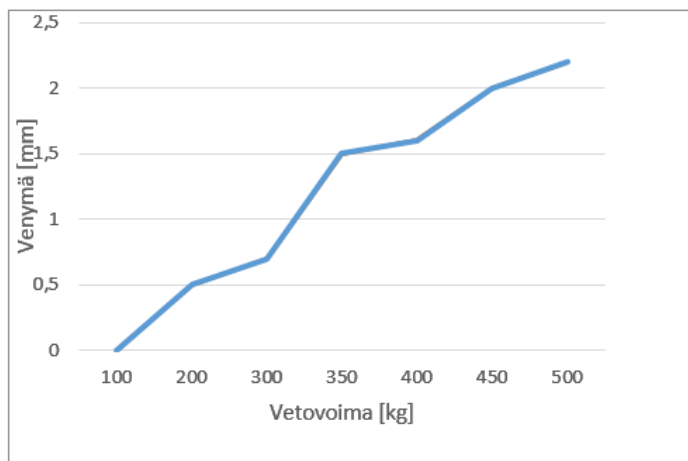
### Ruuvivetokoe:

#### Kuormitus 1.

Vetokuorma [kg]	Venymä [mm]
100	0
200	0,5
300	0,7
350	1,5
400	1,6
450	2
500	2,2

Ruuvivetin mittaus vedon alku: 172 mm

Ruuvivetin mittaus vedon jälkeen: 172mm

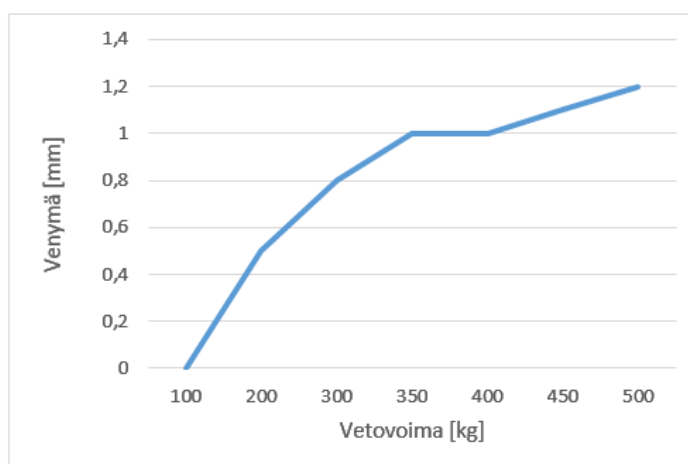


#### Kuormitus 2

Vetokuorma [kg]	Venymä [mm]
100	0
200	0,5
300	0,8
350	1
400	1
450	1,1
500	1,2

Ruuvivetin mittaus vedon alku: 172,5 mm

Ruuvivetin mittaus vedon jälkeen: 172,5mm

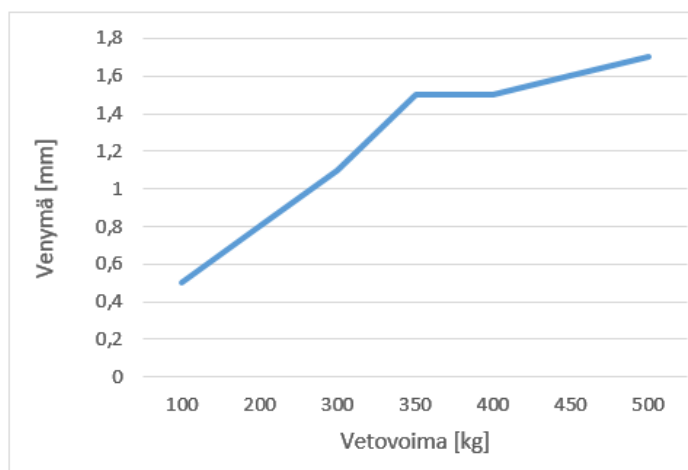


#### Kuormitus 3

Vetokuorma [kg]	Venymä [mm]
100	0,5
200	0,8
300	1,1
350	1,5
400	1,5
450	1,6
500	1,7

Ruuvivetin mittaus vedon alku: 172 mm

Ruuvivetin mittaus vedon jälkeen: 172mm

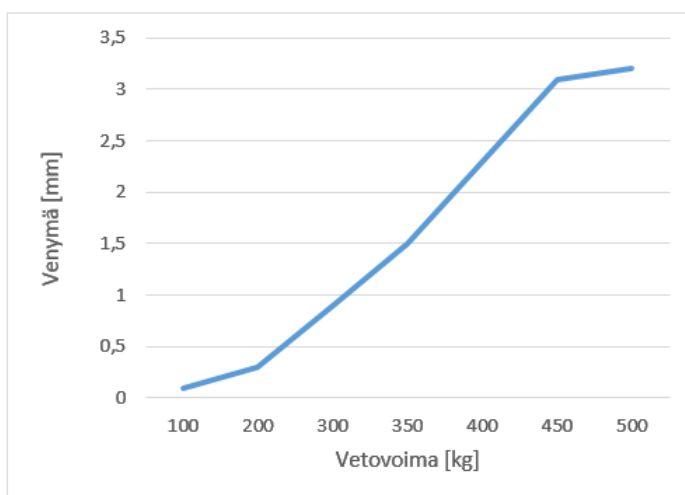


## Kuormitus 4

Vetokuorma [kg]	Venymä [mm]
100	0,1
200	0,3
300	0,9
350	1,5
400	2,3
450	3,1
500	3,2

Ruuvimitta vedon alussa: 173 mm

Ruuvimitta vedon jälkeen: 173mm

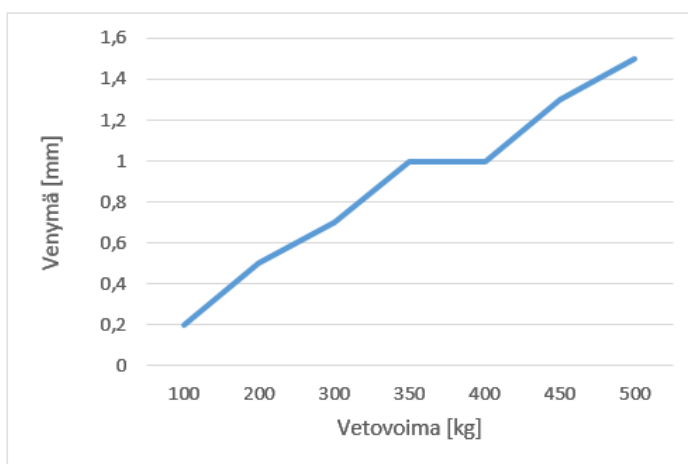


## Kuormitus 5

Vetokuorma [kg]	Venymä [mm]
100	0,2
200	0,5
300	0,7
350	1
400	1
450	1,3
500	1,5

Ruuvimitta vedon alussa: 172,5 mm

Ruuvimitta vedon jälkeen: 172,5mm



## Ruuvimittakiinnitysmomentti:

## Kuormitus 1

Momentti [Nm]	Etuseinämän taipuma [mm]
5	Ei mitattava
7,5	Ei mitattava
10	Ei mitattava
12,5	0,7
14	1,22
15	1,44
16	1,56
17	1,85
18	---

## Kuormitus 2

Momentti [Nm]	taipuma (mm)
10	Ei mitattava
12,5	1,25
14	1,82
15	2,37
16	2,68
17	3,08
18	3,65
19	3,94
20	---

Kuormitus 3

Momentti [Nm]	taipuma (mm)
10	Ei mitattava
12,5	1,51
14	1,91
15	2,29
16	3,3
17	3,42
18	3,61
19	---

Kuormitus 4

Momentti [Nm]	taipuma (mm)
10	Ei mitattava
12,5	Ei mitattava
14	0,93
15	1,35
16	1,1
17	1,15
18	---

Kuormitus 5

Momentti [Nm]	taipuma (mm)
10	Ei mitattava
12,5	1
14	1,3
15	1,33
16	1,9
17	2
18	2,1
19	---

**Kiinnikkeen veto:**

Kuormitus 1		Kuormitus 2		Kuormitus 3	
Vetokuorma [kg]	Kiinnikkeen sivun sivuttainen siirtymä [mm]	Vetokuorma [kg]	Kiinnikkeen sivun sivuttainen siirtymä [mm]	Vetokuorma [kg]	Kiinnikkeen sivun sivuttainen siirtymä [mm]
50	1	50	0,7	50	0,8
100	1,5	100	1,2	100	1,4
110	2,8	110	2,3	110	2,5
120	3,6	120	3	120	3,1
130	4	130	4	130	4,2
140	4,6	140	4,2	140	4,5
150	5	150	5	150	5,2
160	6	160	6,1	160	6,3
170	8,5	170	8,2	170	8
180	9	180	9	180	9,1
190	11	190	10	190	10
200	13	200	12,5	200	12
210	17	210	18	210	17
220	20,5	220	20	220	21
230	26	230	28	230	29
230	36	240	50	240	51
235	46	250	70	250	72
240	53	260	80	260	81
250	70	270	90	270	89
252	75	280	95	280	96
260	80	290	103	290	110
270	87	300	109	300	115
280	93	310	112	310	121
290	100				
300	107				
310	115				

**Kolme kuormitusta.**

Ensimmäisessä kuormituksessa kiinnikettä kuormitettiin 10 kg askelin, kunnes kiinnike alkoi myötää. Myötäämisen jälkeen kiinnikettä kuormitettiin kiristämällä vetolaitetta  $\frac{1}{2}$  -kierrosta kerrallaan. Kiristämisen jälkeen luettiin arvot vetolaitteesta ja mitattiin siirtymä.

Toisessa ja kolmannessa mittauksessa kiinnikettä kuormitettiin loppuun asti 10 kg askelin.

## Kiinnikkeen puristus:

### Kuormitus 1

Kuormitus [kg]	Huomio.
34,5	
50,1	
57,9	
65,7	Jatkokiinnike alkaa taipua
73,5	
81,3	
89,1	Jatkokiinnike taipuu
96,9	
104,7	
112,5	
120,3	
128,1	
135,9	
143,7	
151,5	
159,3	
167,1	Jatkokiinnike noin 9 mm vinossa. Seinäkiinnikkeen sivut myös kallellaan noin 5 mm
174,9	
182,7	Kiinnike + jatkokiinnike vinossa, noin 15mm
190,5	
194,4	
198,3	Nyrjähti

## Kiinnikkeen veto alas, kiinnitys vain ylimmässä reiässä.

### Kuormitus 1

Kuormitus [kg]	Kiinnikkeen kiertymä [mm]
23,8	5,08
35,5	11,76
39,4	13,01
43,3	14,18
47,2	15,01
51,1	15,76
55	16,14
58,9	17,12
66,7	17,87
70,6	18,58
74,5	19,41
78,4	21,08
82,3	22,72
86,2	23,75

### Kuormitus 2

Kuormitus [kg]	Kiinnikkeen kiertymä [mm]
23,8	4,02
35,5	10,02
39,4	12,5
43,3	14,63
47,2	15,23
51,1	15,44
55	16
58,9	16,99
66,7	17,5
70,6	18,51
74,5	19,3
78,4	21,01
82,3	31,03
86,2	32,02

### Kuormitus 3

Kuormitus [kg]	Kiinnikkeen kiertymä [mm]
23,8	5,65
35,5	9,5
39,4	13,35
43,3	16,32
47,2	16,45
51,1	17,23
55	17,55
58,9	18,3
66,7	18,95
70,6	19,2
74,5	22,3
78,4	22,94
82,3	24,13
86,2	24,79

**Kiinnikkeen veto alas, kiinnitys vain keskimmäisessä reiässä.**

Kuormitus 4

Kuormitus [kg]	Kiinnikkeen kiertymä [mm]
12,1	0,33
16	0,98
19,9	1,75
23,8	2,25
27,7	2,71
31,6	2,99
35,5	3,36
39,4	3,1
43,3	2,91
47,2	3,19
51,1	3,51
55	Nurjahti

**Kiinnikkeen veto alas, kiinnitys kahdella ruuvilla.**

Kuormitus 5

Kuormitus [kg]	Kiinnikkeen kiertymä [mm]
12,1	0,13
35,5	0,21
39,4	0,29
43,3	0,79
47,2	1,23
51,1	1,77
55	2,49
58,9	3,49
66,7	4,6
70,6	5,69
74,5	6,31
78,4	7,25
82,3	12,03
86,2	16,04